

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Eletrônica

Estudo de Técnica de Modulação por Largura de Pulso (PWM) Aplicado a Inversores Trifásicos

Autor: Arthur Simões Gonzaga
Orientador: Prof. Dr. Alex Reis

Brasília, DF
24 de janeiro de 2018



Arthur Simões Gonzaga

Estudo de Técnica de Modulação por Largura de Pulso (PWM) Aplicado a Inversores Trifásicos

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr. Alex Reis

Brasília, DF

24 de janeiro de 2018

Arthur Simões Gonzaga

Estudo de Técnica de Modulação por Largura de Pulso (PWM) Aplicado a Inversores Trifásicos/ Arthur Simões Gonzaga. – Brasília, DF, 24 de janeiro de 2018-
56 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Alex Reis

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 24 de janeiro de 2018.

1. energia eólica. 2. engenharia eletrônica. I. Prof. Dr. Alex Reis. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Estudo de Técnica de Modulação por Largura de Pulso (PWM) Aplicado a Inversores Trifásicos

CDU Classificação

Arthur Simões Gonzaga

Estudo de Técnica de Modulação por Largura de Pulso (PWM) Aplicado a Inversores Trifásicos

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 24 de janeiro de 2018:

Prof. Dr. Alex Reis
Orientador

Prof. Dr. Loana Nunes Velasco
Convidado 1

Prof. Dr. Jorge Andrés Cormane Angarita
Convidado 2

Brasília, DF
24 de janeiro de 2018

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a **Deus**, todo poderoso, por ter me dado a dádiva de vida.

Agradeço à minha família, em especial, aos meus pais, **Eliel** e **Rosimary**, por todo o apoio desde meu nascimento até este momento, sempre me auxiliando e me guiando, com muito amor e esforço, para que fosse possível chegar até aqui. Aos meus avôs, **Elias** (*in memoriam*) e **Joana**, ao meu irmão, **Guilherme** e à minha madrinha, **Elizete**, pelas palavras de incentivo e ternura.

Ao meu orientador, **Prof. Dr. Alex Reis**, que me instruiu e dedicou confiança, essenciais para o desenvolvimento deste projeto e por me acompanhar em muitos ensaios até aqui desenvolvidos.

À minha namorada, **Adara**, por todos os conselhos, incentivos e companhia, alinhados ao amor, fundamentais em todas as fases deste trabalho.

Aos meus amigos de graduação, companheiros que proporcionaram momentos únicos durante todos estes anos, proporcionando uma troca de conhecimento imensurável, além do prazer de ter a presença dos mesmos em instantes de dificuldade e felicidade.

Aos professores **Daniel Muñoz**, **Luís Filomeno**, **Diogo Caetano**, **Ronni Amorim**, **Sandro Haddad**, **Leonardo Aguayo** e tantos outros, pelos ensinamentos transmitidos em toda a graduação.

Ao pessoal do Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica e aos professores **Anésio de Leles** e **Lélio Ribeiro**, pelo auxílio na montagem da bancada deste projeto.

À **Universidade de Brasília**, particularmente à **Faculdade do Gama** e ao **Departamento de Energia Elétrica**, que nos disponibilizou as ferramentas necessárias para o desenvolvimento deste projeto através do programa de iniciação científica.

À **Fundação da Universidade de Brasília** e **CNPq** (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pelo apoio financeiro dado à esta pesquisa.

Por fim, a todos que, de alguma maneira, estiveram presentes na construção do saber nestes anos de graduação e na concepção deste trabalho.

Resumo

Com a crescente preocupação da população mundial com a questão energética, o mercado de energia migra gradualmente em busca de uma fonte sustentável. Hoje, a energia eólica surge como uma alternativa para geração de energia elétrica. Um dos pontos importantes desta geração é o sistema de conversão de energia eólica, no qual podem ser implementadas estratégias de controle otimizadas. Este trabalho contempla a implantação de módulos que emulam o funcionamento de um SCEE. Para montagem deste sistema utilizou-se de um variavolt para fornecer tensões ao retificador do sistema que alimentavam o barramento de corrente contínua no inversor. O cerne deste sistema é o inversor, o qual possibilita explorar as estratégias de controle a partir do chaveamento dos IGBTs. No inversor foi testada a técnica SPWM (Modulação por Largura de Pulso Senoidal), desenvolvida em malha aberta em um microcontrolador de baixo custo, o Arduino Mega. O sistema proposto tinha por objetivo ser modular, adaptando-se a novos microcontroladores e novas estratégias. Obteve-se por fim uma plataforma funcional, que permite ao pesquisador explorar assuntos pertinentes à geração de energia eólica, estratégias de controle, validada por meio da implementação do SPWM, e qualidade de energia.

Palavras-chaves: energia eólica, qualidade de energia elétrica, sistemas de controle.

Abstract

The growing concern of the world population with the energy issue, the market of energy gradually migrates in search of a sustainable source. Actually, wind energy appears as an alternative into electric power generation. Main point of this generation is the wind energies' conversion system (WECS), about which control strategies can be implemented. In this work, is discussed the implementation of modules that emulate the operation of a WECS. For assembly of this system, a varivolt was used to provide voltages to the rectifier that fed the DC bus in the inverter. The core of this system is the inverter, which makes it possible to explore the control strategies from the IGBT switching. In the inverter, the SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation) technique, developed in an open loop in a low cost microcontroller, the Arduino Mega, was tested. The proposed system intended to be modular, can be adapted to new microcontrollers and new strategies. Finally, a functional platform created allows the researcher to explore issues related to wind power generation, control strategies, validated through the implementation of SPWM, and energy quality.

Key-words: wind energy, electric power quality, control systems.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Produção de energia elétrica no ano de 2014. Fonte: (EPE, 2017).	13
Figura 2 – Geração bruta no ano de 2018 até o mês de julho dividido por fonte energética. Fonte: Dados de Geração das CGEE participantes do PROINFA. . .	14
Figura 3 – Capacidade instalada de Energia Eólica no Brasil. Fonte: (ABEEólica, 2017). .	15
Figura 4 – Diagrama de interfaces na geração de energia eólica. Fonte: (PINTO, 2013). .	17
Figura 5 – Relação entre potência gerada e energia mecânica. Fonte: (SILVEIRA, 2017). .	19
Figura 6 – Regiões de operação. Relação entre velocidade do vento e potência fornecida. Fonte: (CARVALHO et al., 2006).	19
Figura 7 – Turbina Darrieus. Fonte: Éole à Cap-Chat en 2010.	20
Figura 8 – Turbina Horizontal. Fonte: (PEREIRA; FUKUDA, 2016).	21
Figura 9 – Turbinas <i>Upwind</i> e <i>Downwind</i> . Fonte: (PINTO, 2013).	21
Figura 10 – Esquema de conexão de um Gerador Assíncrono em Gaiola de Esquilo. Fonte: (PINTO, 2013).	22
Figura 11 – Sistema de Conversão com DFIG. Fonte: (PINTO, 2013).	23
Figura 12 – Esquema de conexão dos Geradores Síncronos. Fonte: (PINTO, 2013). . . .	23
Figura 13 – Conversor retificador a diodo com conversor boost cascadeado. Fonte: (REIS; OLIVEIRA, 2015).	25
Figura 14 – Conversor back-to-back, controlado por PWM. Fonte: (REIS; OLIVEIRA, 2015). .	25
Figura 15 – Sinal PWM com <i>duty-cycle</i> de 50%. Fonte: (BRAGA, 2003).	26
Figura 16 – Definição de <i>duty-cycle</i> . Fonte: (BRAGA, 2003).	26
Figura 17 – <i>Duty-cycle</i> de 1% e 99%. Fonte: (BRAGA, 2003).	26
Figura 18 – PWM Senoidal, com <i>duty-cycle</i> variável. Fonte: (BRAGA, 2003).	27
Figura 19 – Comparação entre a moduladora e portadora. Fonte: (ROCHA, 2014). . . .	28
Figura 20 – Vetores Espaciais. Fonte: (SILVEIRA, 2017).	29
Figura 21 – Esquemático do Sistema.	32
Figura 22 – Imagem superior do varivolt utilizado na bancada.	33
Figura 23 – Imagem frontal do varivolt utilizado na bancada.	34
Figura 24 – Retificador utilizado na bancada.	34
Figura 25 – Esquema de fonte simétrica +15V e -15V para alimentação do sistema de controle.	35
Figura 26 – Fonte simétrica +15V e -15V para alimentação do sistema de controle. . .	35
Figura 27 – Inversor de Frequência SPCIT 1000-80-20	36
Figura 28 – Placa de interface entre o microcontrolador e o inversor de frequência. . .	37
Figura 29 – <i>Arduino Mega</i> , com processador <i>ATmega2560</i>	37
Figura 30 – Circuito de indutores em série com os resistores de potência	38

Figura 31 – Onda dente-de-serra gerada pelo hardware do <i>ATmega2560</i> . Fonte: (MICROCHIP, 2014).	40
Figura 32 – Imagem dos semiciclos defasados de 120°	41
Figura 33 – Saída do microcontrolador com $M_s = 0.5$	42
Figura 34 – Saída do microcontrolador com $M_s = 1.0$	42
Figura 35 – Saída do microcontrolador com $M_s = 1.5$	42
Figura 36 – Saída PWM com frequência de 2.5kHz	43
Figura 37 – Saída PWM com frequência de 7.5kHz	43
Figura 38 – Tensão na saída do inversor, frequência de chaveamento de 5kHz e $M_s = 0.5$	44
Figura 39 – Tensão na saída do inversor, frequência de chaveamento de 5kHz e $M_s = 1.0$	44
Figura 40 – Tensão na saída do inversor, frequência de chaveamento de 5kHz e $M_s = 1.5$	44
Figura 41 – Tensão na saída do inversor, frequência de chaveamento de 2.5kHz e $M_s = 0.5$	45
Figura 42 – Tensão na saída do inversor, frequência de chaveamento de 2.5kHz e $M_s = 1.0$	45
Figura 43 – Tensão na saída do inversor, frequência de chaveamento de 2.5kHz e $M_s = 1.5$	45
Figura 44 – Tensão na saída do inversor, frequência de chaveamento de 7.5kHz e $M_s = 0.5$	46
Figura 45 – Tensão na saída do inversor, frequência de chaveamento de 7.5kHz e $M_s = 1.0$	46
Figura 46 – Tensão na saída do inversor, frequência de chaveamento de 7.5kHz e $M_s = 1.5$	47
Figura 47 – Transformada de Fourier do sinal de saída do inversor, frequência de chaveamento de 2.5kHz e $M_s = 1.0$	47
Figura 48 – Transformada de Fourier do sinal de saída do inversor, frequência de chaveamento de 5kHz e $M_s = 1.0$	47
Figura 49 – Transformada de Fourier do sinal de saída do inversor, frequência de chaveamento de 7.5kHz e $M_s = 1.0$	48

Lista de tabelas

Tabela 1 – Possibilidades de chaveamento do Inversor	28
Tabela 2 – Módulo dos Vetores de Comutação do domínio $\alpha\beta$. Fonte: (SILVEIRA, 2017)	30
Tabela 3 – Tempo de Chaveamento de cada vetor. Fonte: (NAZLEE et al., 2010)	30
Tabela 4 – Informações retiradas do <i>Datasheet</i> do Inversor	36
Tabela 5 – Pinos utilizados no Arduíno e nome utilizado no microcontrolador. Fonte: (MICROCHIP, 2014).	40
Tabela 6 – DHT obtidos com a FFT dos sinais de saída do inversor.	48

Lista de abreviaturas e siglas

AIE	Agência Internacional de Energia
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CGEE	Central de Geração de Energia Elétrica
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
kWh	Quilowatt-hora
LQEE	Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PLL	<i>Phased Locked Loop</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PROINFA	Programa de Incentivo à Fontes Alternativas
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
SCEE	Sistema de Conversão de Energia Eólica
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TEEH	Turbina de Eixo Horizontal
UnB	Universidade de Brasília

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Contextualização	13
1.2	Objetivos	15
1.2.1	Objetivo Geral	15
1.2.2	Objetivos específicos	15
1.3	Metodologia Científica	16
1.4	Organização do Trabalho	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	Sistemas de Conversão de Energia Eólica	17
2.1.1	Dinâmica do Vento e da Turbina	17
2.1.2	Topologias das Turbinas	19
2.1.3	Geradores de Energia	21
2.1.3.1	Gerador Assíncrono em Gaiola de Esquilo	22
2.1.3.2	Gerador Assíncrono com Dupla Alimentação	22
2.1.3.3	Gerador Síncrono de Ímã Permanente	23
2.1.3.4	Gerador de Rotor Bobinado	23
2.1.4	Conversores de Potência	24
2.2	Modulação por Largura de Pulso	25
2.2.1	PWM Senoidal	27
2.2.2	SVPWM	28
2.3	Considerações Finais	31
3	DESENVOLVIMENTO	32
3.1	Elementos da Bancada	32
3.1.1	Varivolt	32
3.1.2	Retificador a Diodo	33
3.1.3	Fonte DC	33
3.1.4	Inversor de Frequência	35
3.1.5	Interface com o Microcontrolador	36
3.1.6	Microcontrolador Arduino Mega	37
3.1.7	Filtro Indutivo e Circuito de Carga	38
3.2	Estratégia de Controle Implementada	39
3.2.1	PWM Senoidal	39
4	RESULTADOS	41

4.1	Ensaio com o microcontrolador	41
4.2	Ensaio realizado no inversor	43
4.3	FFT dos Sinais	46
4.4	Distorção Harmônica Total	48
4.5	Considerações Finais	48
5	CONCLUSÃO	50
	REFERÊNCIAS	51
	ANEXOS	53
	ANEXO A – CÓDIGO SPWM	54

1 Introdução

1.1 Contextualização

Energia é um pilar essencial para o desenvolvimento socioeconômico e para o aumento na qualidade de vida em todas as nações, conforme afirma ALLOUHI et al. (2015), no que se refere a todas as atividades cotidianas, sejam elas para questões de mobilidade ou até mesmo para promoção de conforto. É tida, nos últimos anos, como um dos campos de atuação dentro da engenharia elétrica, e apoiada nos crescentes incentivos financeiros e políticos que se materializam em um aumento da participação, nas matrizes energéticas de diversos países, das fontes renováveis.

Os combustíveis fósseis são as maiores fontes de energia utilizadas para a geração de energia elétrica. Atualmente 65,9% da produção mundial de energia elétrica funciona à base do petróleo e seus derivados. De acordo com relatório da EPE (2017), o restante da produção é dividida entre fontes hídricas, nucleares, de biomassa, eólicas, fotovoltaicas, como pode ser observado na figura 1. Este cenário tende a mudar, pois, segundo SIEMINSKI et al. (2014), a utilização de energias renováveis e energia nuclear vem aumentando mais a cada ano, a exemplo da energia eólica que em 2012 era responsável por 379 bilhões de *kWh*, mas que tende a crescer em torno de 1,3 trilhão de *kWh* para o ano de 2040. Então, com a crescente demanda de energia elétrica somada à busca por atenuar os efeitos ambientais da produção de energia promovidos na geração, resulta em aspectos positivos nos diversos ecossistemas, tendo em vista que surgem novas demandas por fontes de energia sustentáveis, consoante REIS; OLIVEIRA (2015).

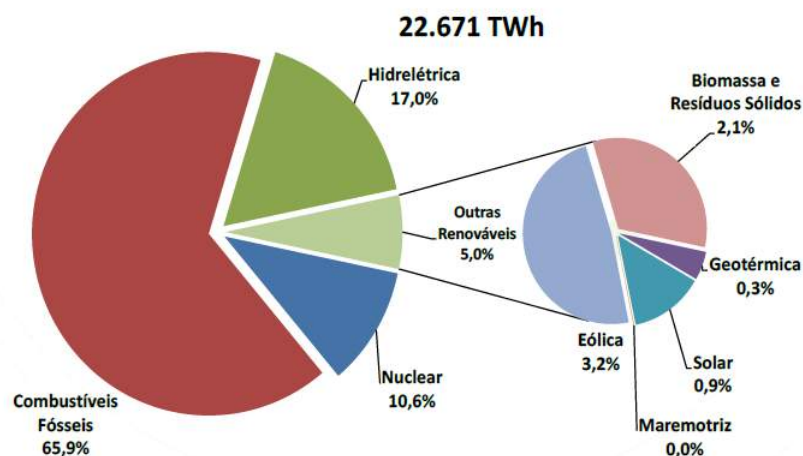


Figura 1 – Produção de energia elétrica no ano de 2014. Fonte: (EPE, 2017).

Vários países estão incentivando o uso de energia limpa, a fim de obter um crescimento desta forma de geração. A China, 5º maior produtor de energia elétrica por fontes renováveis em 2007, tinha capacidade de produzir cerca 5.906 MW a partir de fontes eólicas, já em 2017, chegou à primeira posição com a produção de 19.500 MW (GWEC, 2017). O caso do Brasil não é muito diferente. Com a criação da Lei nº 10.438/2002, o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (PROINFA), tem por meta diversificar a malha energética brasileira, que hoje é baseada na geração hidrotérmica, incentivando a geração de energia elétrica através de fontes alternativas (tais como parques eólicos e geradores termelétricos a biomassa), privilegiando empreendedores que não tenham vínculos societários com concessionárias de geração, transmissão ou distribuição, chamados de Produtores Independentes de Energia (PIE). Para o ano de 2018, segundo a ANEEL, as cotas de incentivo atingiram os valores de R\$ 3,4 bilhões de reais, divididos entre distribuidoras, transmissoras e cooperativas. Hoje, as Centrais de Geração de Energia Elétrica (CGEE) já produziram 4,8 MW. Estima-se que cerca de 20% desta geração foi promovida por meio dos ventos, como pode ser observado na figura 2. Outro ponto que reforça a utilização de energia renovável no país é o aumento da capacidade instalada para produção de energia eólica no Brasil, explicitado na figura 3. Segundo dados do relatório ABEEÓLICA (2017), a capacidade instalada acumulada em 2005 era de aproximadamente 27,1 MW, contudo, no ano de 2017 atingiu 12.767 MW e de acordo com as previsões, tende a chegar a 17.880 MW nos próximos 6 anos (GWEC, 2017).

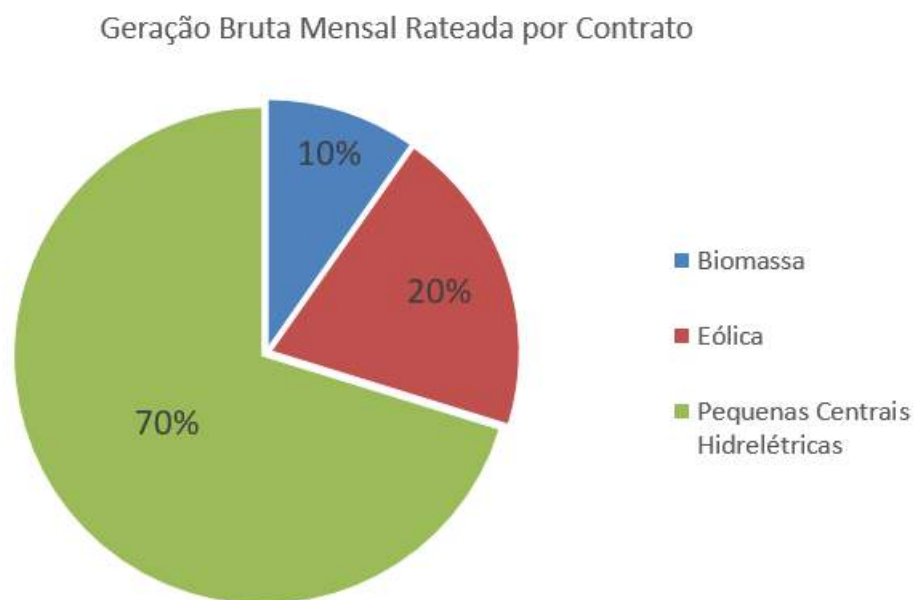


Figura 2 – Geração bruta no ano de 2018 até o mês de julho dividido por fonte energética. Fonte: Dados de Geração das CGEE participantes do PROINFA.

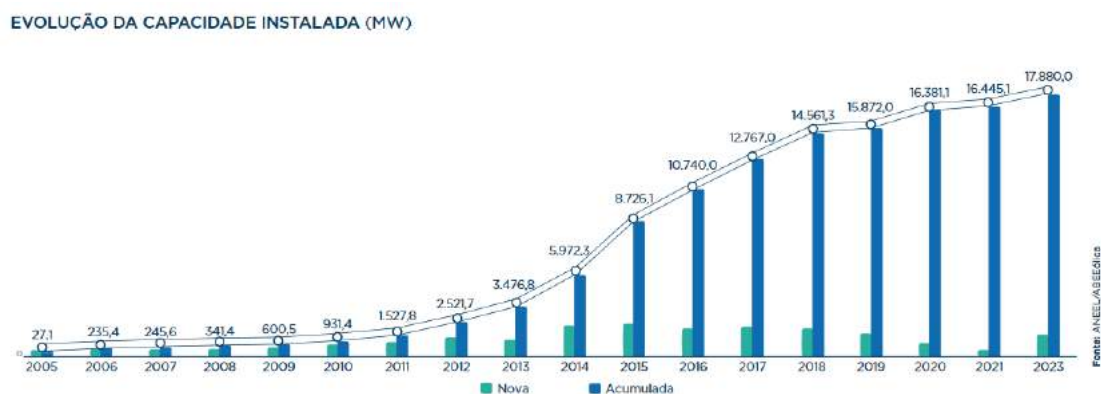


Figura 3 – Capacidade instalada de Energia Eólica no Brasil. Fonte: (ABEEólica, 2017).

Ademais, com a crescente utilização de equipamentos eletrônicos ao redor do mundo, a energia vem sendo tratada como um produto a ser comercializado. Isto reflete em uma maior preocupação por parte dos consumidores com o produto que lhes é entregue. Isso traz um ponto a ser discutido na geração, transmissão e distribuição: a qualidade de energia elétrica (QEE). No Brasil, as atividades relacionadas ao funcionamento e desempenho do sistema elétrico de distribuição seguem uma padronização explicitada através do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), elaborado pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). As normalizações referentes à geração de energia seguem os Procedimentos de Rede, estabelecidos pelo ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), responsável também pela avaliação, operação e administração do sistema elétrico.

Por sua vez, o ONS observa os diversos aspectos relacionados com a Qualidade de Energia Elétrica, dos quais os principais são: distúrbios referentes à frequência do sinal elétrico, flutuação da tensão em regime permanente, distorção harmônica de tensão, fator de potência entregue e continuidade do serviço.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é apresentar a implementação de módulos de controle em uma plataforma laboratorial para estudo da energia eólica, voltado para estudos relacionados à geração de energia eólica. O trabalho foca em aplicar estratégias de controle por meio de microcontroladores.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Realizar uma avaliação da plataforma laboratorial e seus módulos já disponíveis;
2. Estudar os elementos utilizados na geração de energia eólica;

3. Pesquisar técnicas de modulação utilizadas em controle de inversores;
4. Implementar as principais estratégias para inversores;
5. Analisar os resultados decorrentes da implementação.

1.3 Metodologia Científica

A metodologia seguida neste trabalho de conclusão de curso (TCC) tem natureza descritiva, tendo em vista que iniciou-se com um levantamento bibliográfico sobre os aspectos energéticos e entendimento sobre os métodos de geração de energia, concomitantemente, ao início da concepção laboratorial, no Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica (LQEE) da Universidade de Brasília (UnB). Visa demonstrar as técnicas utilizadas na construção da plataforma, tornando-o também uma documentação do projeto para posteriori e fornecendo uma contribuição para replicações do trabalho em outros laboratórios.

1.4 Organização do Trabalho

O trabalho está dividido em 5 partes: Introdução, Referencial Teórico, Desenvolvimento do Cenário Laboratorial, Resultados e Discussões e Conclusão. No capítulo 1 é feita a introdução e apresentação da proposta; No capítulo 2 é apresentado o cenário dos estudos acerca da energia eólica; No capítulo 3 demonstra-se as estruturas laboratoriais, assim como suas especificações; Discute-se os resultados obtidos no capítulo 4; Finalmente, é feita a conclusão no capítulo 5.

2 Referencial Teórico

Este capítulo é um levantamento teórico que apresenta os componentes presentes nos sistemas de geração de energia eólica. As seções são divididas a fim de abordar os aspectos gerais de cada um dos componentes da bancada, descrevendo também a sua operação e os efeitos positivos e negativos que influenciam na geração.

2.1 Sistemas de Conversão de Energia Eólica

Todos os sistemas de geração de energia utilizam da transferência de energia mecânica como fonte para produção de energia elétrica.

O sistema de geração eólica tem uma turbina, que pode apresentar diferentes topologias, que é a interface para transformar a energia cinética proveniente dos ventos, refletindo na rotação das pás, ocorrendo a rotação no gerador. Entre a turbina e o gerador, a topologia pode demandar caixas de engrenagens para que haja um aumento na velocidade no eixo conectado ao gerador (PINTO, 2013). Após o gerador, por meio de uma interface de conexão, obtém-se energia elétrica, que pode ser transmitida para a rede, grande maioria dos casos, ou armazenada em baterias. A interface de conexão pode conter elementos essenciais para controle do sistema de conversão, como inversores de frequência, que permitem o controle de amplitude, fase e frequência.

De certa maneira, este processo pode ser sintetizado de acordo com a figura 4:

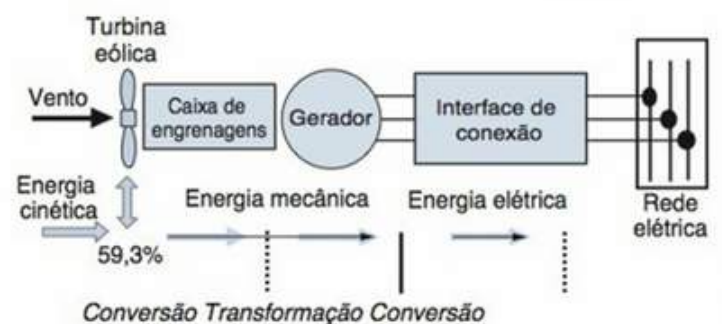


Figura 4 – Diagrama de interfaces na geração de energia eólica. Fonte: (PINTO, 2013).

2.1.1 Dinâmica do Vento e da Turbina

O conceito abordado pelo autor MARTINS; GUARNIERI; PEREIRA (2008), define o vento como o movimento de parcelas de ar de forma horizontal, paralelo à superfície do nosso planeta, apesar de poder ser utilizado também para movimentação vertical. Complementando

esta afirmação, PINTO (2013), é sabido que o que gera tais movimentações é a incidência não uniforme de raios solares na superfície terrestre, aquecendo o planeta de forma desigual e promovendo a movimentação das massas de ar. Temperatura, umidade e pressão também são características meteorológicas fundamentais do ar e influenciam diretamente na sua velocidade ou direção.

O vento é considerado uma grandeza vetorial, tendo em vista que possui sentido, módulo e direção. Na modelagem de BONELLI et al. (2010), são apresentadas a quantificação da energia extraída pela turbina. Como o vento é decorrente de um movimento, sua energia é classificada como energia cinética. Ela é apresentada da seguinte maneira, dada em $[J/m^3]$, em relação à velocidade do vento v_{vento} (BONELLI et al., 2010):

$$E = \frac{1}{2} \rho v_{vento}^2 \quad (2.1)$$

Desenvolvendo a equação, chega-se à potência P_{vento} (2.2) absorvida pelas pás, em relação à velocidade do vento v_{vento} e à área A nas quais a superfície das pás tem contato com o vento (BONELLI et al., 2010), contudo, baseado na Lei de Betz, a eficiência máxima das pás da turbina são de aproximadamente 59,3%. Este fenômeno é explicado pelo fato de que a velocidade do vento após a turbina não é nula, apesar de sofrer uma redução, isto implica na extração parcial do vento pela turbina. Por este motivo, define-se então o coeficiente de potência, na equação 2.3.

$$P_{vento} = \frac{1}{2} \rho A v_{vento}^3 \quad (2.2)$$

$$C_p = \frac{P_{mec}}{P_{vento}} \quad (2.3)$$

Relacionando, então, (2.2) com (2.3), obtém-se (2.4), que modela a potência mecânica máxima entregue ao gerador do sistema de conversão.

$$P_{mec} = \frac{1}{2} C_p \rho A v_{vento}^3 \quad (2.4)$$

Baseando nas equações, CARVALHO et al. (2006) apresenta um gráfico, figura 5, que explicita a potência gerada de acordo com a velocidade do vento, em turbinas de velocidade fixa ou variável, relacionando com a rotação por minuto da turbina.

Um tópico importante no processo de conversão de energia, é saber as regiões de operação das turbinas eólicas. Segundo MARQUES et al. 2004, as turbinas eólicas compreendem quatro regiões de operação: (I) Região de Partida, no qual contempla a velocidade mínima para vencer a inércia e iniciar o movimento mecânico, onde ocorre o chamado *cut-in*, início da operação da turbina. Se dá entre 3 e 5 m/s; (II) Região de Operação Normal, depende do

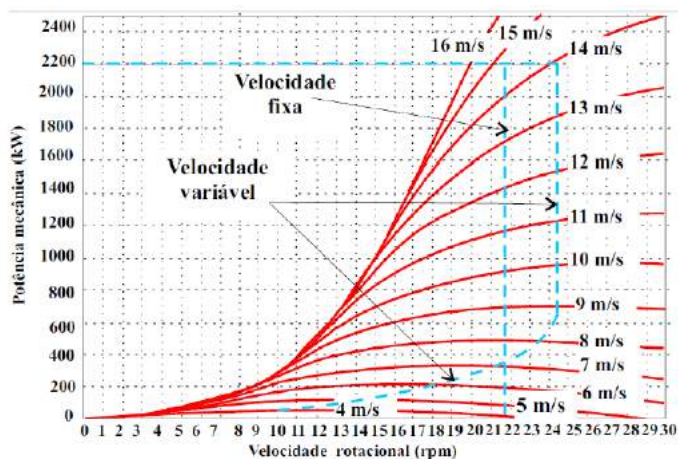


Figura 5 – Relação entre potência gerada e energia mecânica. Fonte: (SILVEIRA, 2017).

tipo de gerador e do seu sistema de controle; (III) Região de Limitação da Potência, limita a potência de saída da turbina de acordo com seu valor nominal. É atingida desde os 12 m/s até os 25 m/s; (IV) Região de Desligamento, ocorre para proteção dos componentes, pois ventos acima de 25 m/s são esporádicos e podem gerar energia extra, prejudicando os sistemas da turbina, nessa região ocorre o *cut-off*, desligamento da turbina. A figura 6 explicita uma relação entre a região de operação, a velocidade do vento e a potência extraída pela turbina.

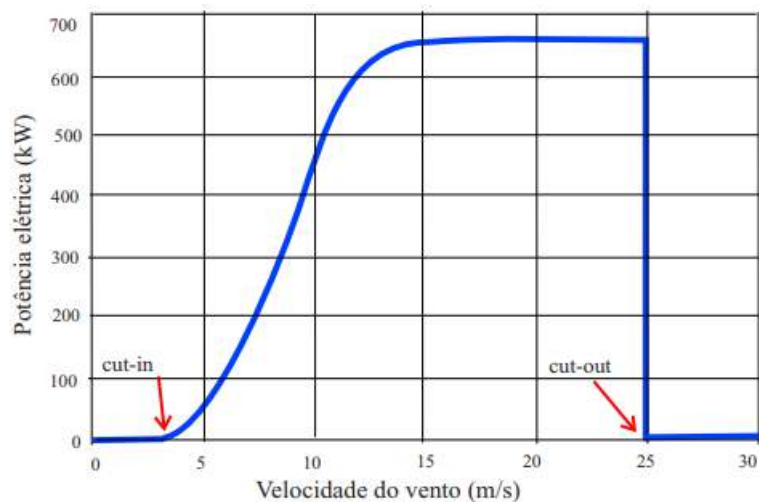


Figura 6 – Regiões de operação. Relação entre velocidade do vento e potência fornecida. Fonte: (CARVALHO et al., 2006).

2.1.2 Topologias das Turbinas

O principal método de classificação utilizado pelos autores é referente ao eixo no qual as pás da turbina giram. Existem dois tipos principais, as turbinas de eixo horizontal (do inglês *horizontal axis wind turbine*, HAWT) e as turbinas de eixo vertical (do inglês *vertical axis wind turbine*, VAWT).

Entre as duas classificações, as turbinas de eixo vertical se sobressaem quanto ao número de modelos já implementados. Os primeiros modelos projetados foram turbinas de eixo vertical, devido a dois fatores principais: não há necessidade de utilização do *yaw system*, sistema utilizado para direcionamento da turbina de acordo com a direção do vento; além disto, os componentes do sistema de conversão podem ser instalados à nível de solo, o que facilita a manutenção e substituição. Todavia, as turbinas de eixo vertical tem uma desvantagem. Como elas ficam próximas ao solo, a incidência e a velocidade do vento é menor, isto implica em uma redução da potência disponível. Os principais modelos de eixo vertical são os modelos *Darrieus*. O rotor *Darrieus* foi a única máquina de eixo vertical que obteve sucesso comercialmente, principalmente devido a pesquisas nos anos 60 e 70 no Canadá e nos Estados Unidos. O formato característico deste modelo de turbina pode ser observado na figura 7. (PINTO, 2013)



Figura 7 – Turbina Darrieus. Fonte: Éole à Cap-Chat en 2010.

Atualmente os modelos de turbina com eixo horizontal são os mais populares. A figura 8 é demonstrada um parque eólico com este modelo de turbina, localizado no Nordeste Brasileiro. Essa máquinas tem ainda duas topologias: *Upwind*, na qual o vento incide na parte traseira das pás, e *Downwind*, onde incide pela parte frontal das pás, a diferença das duas é explicitada na figura 9. O principal motivo para popularização deste modelo é referente às possibilidades de controle na geração da energia. Estas turbinas permitem um ajuste do ângulo das pás, o que influencia diretamente na velocidade do rotor e na potência gerada. Além do controle, o perfil

aerodinâmico das pás e o ângulo perpendicular que as mesmas fazem com o vento otimizam a eficiência da turbina. Devido à altura da torre, a turbina tem acesso a ventos mais velozes, contudo, também existem dificuldades devido ao seu tamanho. A dificuldade no transporte, instalação e manutenção são as complicações advindas do porte que as turbinas têm. (PINTO, 2013)



Figura 8 – Turbina Horizontal. Fonte: (PEREIRA; FUKUDA, 2016).

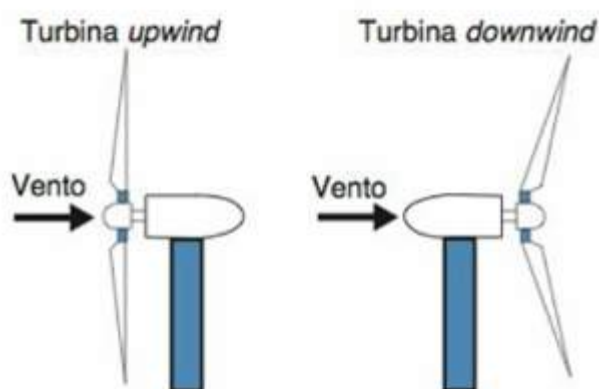


Figura 9 – Turbinas *Upwind* e *Downwind*. Fonte: (PINTO, 2013).

2.1.3 Geradores de Energia

Os geradores são máquinas elétricas que realizam a conversão de energia mecânica em energia elétrica. A classificação dos geradores é dada de duas maneiras: máquinas assíncronas, também chamadas de máquinas de indução, e máquinas síncronas. Segundo (MARQUES et al.,

2004), as máquinas assíncronas mais comuns na operação em energia eólica são os geradores Gaiola de Esquilo e com Dupla Alimentação. Nas máquinas síncronas, existem duas topologias, Rotor Bobinado e à Ímã Permanente.

2.1.3.1 Gerador Assíncrono em Gaiola de Esquilo

Em inglês, *Squirrel Cage Induction Generator (SCIG)*, é o modelo mais utilizado em turbinas de velocidade fixa, porém alguns modelos permitem a sua utilização em sistemas com duas velocidades utilizando dois geradores simultâneos, conforme afirma (MARQUES et al., 2004). Ele tem um baixo custo e é de fácil implementação, contudo, não permite um sistema de controle mais robusto e peca em relação à eficiência. Geralmente é acoplado a um *soft-starter*, para obter uma inicialização mais suave. Este gerador gera elevado estresse mecânico na caixa de engrenagem e no rotor, principalmente no momento em que há a mudança de polos. O SCEE é com SCIG pode ser representado conforme a figura 10.

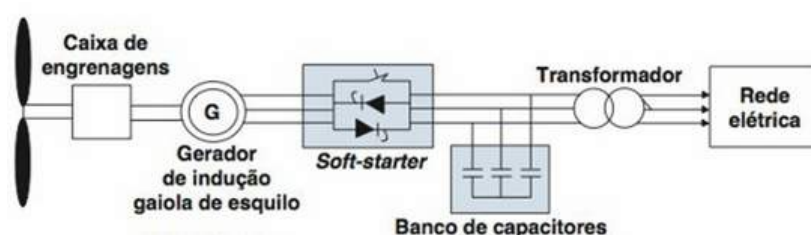


Figura 10 – Esquema de conexão de um Gerador Assíncrono em Gaiola de Esquilo. Fonte: (PINTO, 2013).

2.1.3.2 Gerador Assíncrono com Dupla Alimentação

Este tipo de gerador é comumente usado em aplicações com turbinas eólicas conectadas à rede elétrica e tem a vantagem de poder ser utilizado em turbinas de velocidade variável. O rotor da turbina pode ser, desta forma, conectado diretamente ao gerador. Em relação ao SCIG, o DFIG (do inglês *Doubly-Fed Induction Generator*) tem um melhor desempenho mecânico, isto é, possui menores perdas devido à eliminação de caixas de engrenagem. Contudo, necessita de um sistema de conversão de potência para ser acoplado à rede elétrica, como explicitado na figura 11. (MARQUES et al., 2004)

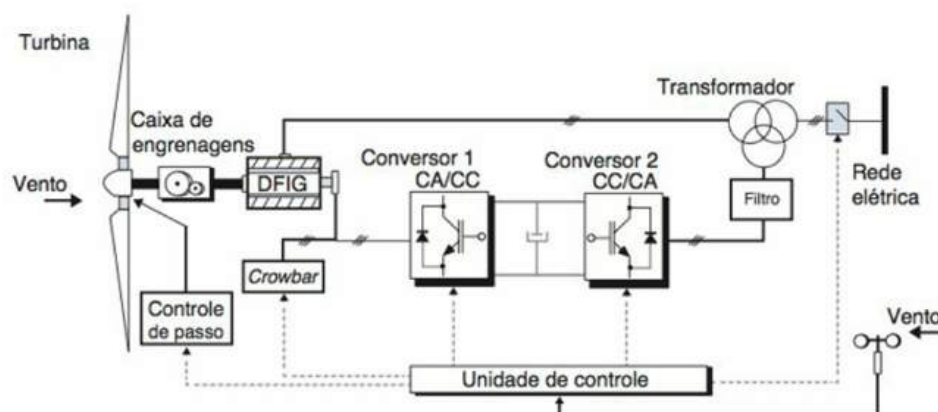


Figura 11 – Sistema de Conversão com DFIG. Fonte: (PINTO, 2013).

2.1.3.3 Gerador Síncrono de Ímã Permanente

As máquinas síncronas levam este nome por terem as tensões induzidas no estator, parte fixa da máquina, sincronizadas com a velocidade em que o rotor, parte móvel, se encontra. O rotor da máquina pode ser construído de duas maneiras: por meio de um ímã permanente ou de um eletroímã. O funcionamento dos geradores se dão por meio de um campo magnético produzido pelo rotor do gerador que produz um campo magnético girante na máquina. Este campo girante induz tensão no estator, por meio de uma tensão nos enrolamentos de armadura. (CHAPMAN, 2013)

O tipo de gerador mais promissor na geração eólica é o de ímã permanente. Da sigla em inglês, PMSG (*Permanent Magnet Synchronous Generator*), tem na sua construção ímãs fixos, com polos salientes ou cilíndricos, que induzem a tensão nos enrolamentos do estator sem excitação externa. Este tipo de gerador possui menores perdas de cobre, todavia, tem um elevado custo por seu material magnético ser caro e necessita sempre de um conversor de potência, para realizar a compensação de potência. O SCEE com PMSG foi demonstrado por (PINTO, 2013), de acordo com a figura 12.



Figura 12 – Esquema de conexão dos Geradores Síncronos. Fonte: (PINTO, 2013).

2.1.3.4 Gerador de Rotor Bobinado

Diferente do PMSG, o Gerador de Rotor Bobinado precisa de uma excitação CC no rotor para gerar o campo magnético. Essa excitação pode ser fornecida por anéis coletores e

escovas ou então por meio de um excitatriz sem escovas com um retificador. Somado às perdas no cobre, faz com que o gerador de rotor bobinado seja menos eficiente do que o PMSG.

2.1.4 Conversores de Potência

Os geradores síncronos e todos os sistemas que possuem velocidade variável têm como necessidade a utilização de conversores de potência, no caso do gerador síncrono para energia eólica isto se deve à variação de velocidade do rotor, que é relacionada diretamente com a velocidade do vento, implicando em uma alteração na frequência do sinal produzido no estator. Ademais, para conexão do SCEE na rede, é necessário atender aos requisitos impostos pelo ONS em relação à QEE do sistema elétrico, para tal, os conversores de frequência são responsáveis por condicionar os níveis de tensão e frequência do sistema de geração (SOARES, 2012). Segundo SANTOS (2015), existem dois tipos de conversores comuns nos SCEE: Conversores síncronos com retificador a diodo conjunto a um conversor boost e Conversores síncronos retificadores e inversores a modulação de pulso (PWM), ou conversor *back-to-back*. O que diferencia as duas topologias é somente a estrutura do retificador.

O conversor de frequência pode ser caracterizado como um dispositivo não-linear, feito de componentes eletrônicos de potência, tais como os IGBTs (*Insulated-Gate Bipolar Transistor*), SCRs (*Silicon Controlled Rectifier*), Triacs e outros componentes controláveis à base de silício.

O conversor é comumente dividido em três partes, retificador, barramento CC e inversor. Depende da topologia se o retificador é controlável ou não, isto é decorrente do tipo de componente utilizado, IGBTs ou diodos, na retificação. O barramento CC é fruto da retificação do sinal de saída do gerador. Conectado ao barramento, temos o inversor. Nesta etapa, realiza-se o controle do sinal, que deve ser condicionado à saída para que seja conectado na rede elétrica com os padrões estabelecidos por norma.

A primeira topologia apresentada é composta primeiro por um retificador a diodo que tem um barramento de corrente contínua (CC) em série com um conversor boost. O conversor boost tem como função aumentar o nível de tensão para injetar potência na rede elétrica (SANTOS, 2015). Pode-se observar a topologia indicada na figura 13.

O conversor controlado a PWM é uma topologia muito versátil e hoje é a mais utilizada em conversores plenos, por possuir controle tanto na retificação quanto na inversão do sinal, possibilitando o controle de potência reativa e ativa. Além disto, é possível ter um fluxo bidirecional na turbina (TEODORESCU; LISERRE; RODRIGUEZ, 2011). Na otimização da potência gerada, é necessário a utilização de técnicas de rastreamento (tal como o *Phase Locked Loop*)(PLL), que permite sincronizar a tensão de saída do gerador, que é relacionada com a velocidade das pás e do vento, com a finalidade de garantir maior eficiência do gerador. Ademais, para uma maior potência a ser gerada, o PLL contribui com o rastreamento do

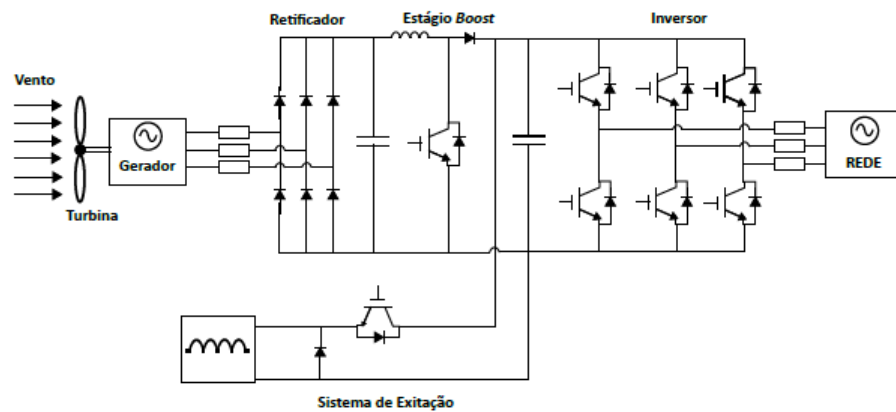


Figura 13 – Conversor retificador a diodo com conversor boost cascadeado. Fonte: (REIS; OLIVEIRA, 2015).

ponto de máxima potência da turbina, podendo extrair a mesma em diversas condições de velocidade do vento. A figura 14 descreve graficamente o modelo do sistema de conversão controlado por PWM.

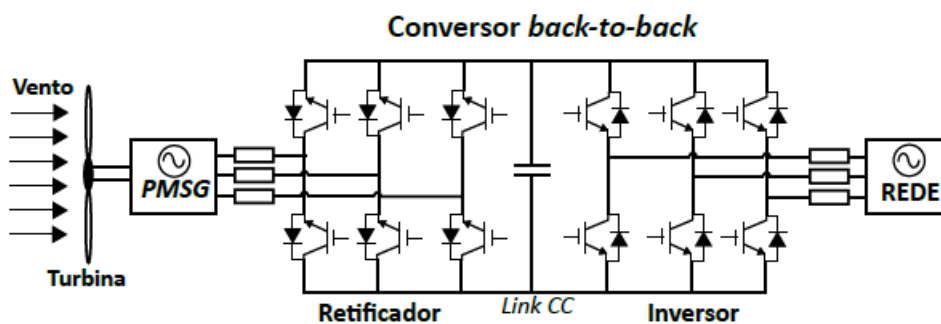


Figura 14 – Conversor back-to-back, controlado por PWM. Fonte: (REIS; OLIVEIRA, 2015).

2.2 Modulação por Largura de Pulso

O *PWM - Pulse Width Modulation*, na tradução para o português é a modulação por largura de pulsos, é uma técnica de modulação digital que utiliza de pulsos para gerar um nível de tensão média. As duas aplicações mais comuns da técnica é entregar valores variáveis de tensão à carga ou até mesmo modular um sinal através de uma portadora, uma onda quadrada, isto baseado no seu *duty-cycle*, que é a proporção em que a onda fica em nível alto em relação ao tempo total. (BOGLIETTI et al., 1993)

Com o advento dos dispositivos baseados em silício, conhecidos como semicondutores, o PWM vem se tornando uma técnica muito utilizada em dispositivos de eletrônica de potência. Pela modulação é possível obter controle da frequência, tensão e posição angular dos fasores de tensão nas cargas. (SOARES, 2012).

Na figura 15, pode-se observar os parâmetros de um sinal quadrado com inferências a um PWM. Com um duty-cycle de 50%, é esperado que o valor médio contínuo aplicado na carga, seja de 50 % o valor da tensão máxima do sinal.

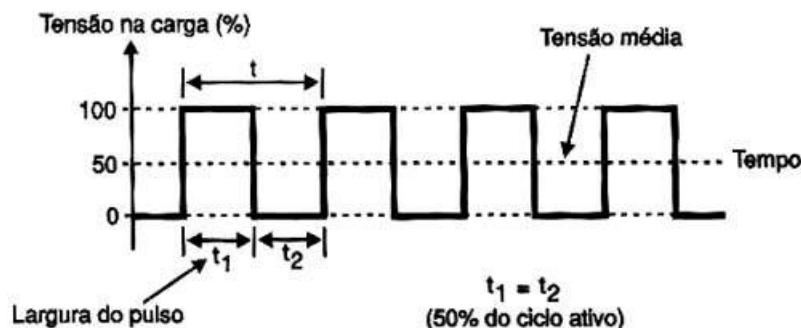


Figura 15 – Sinal PWM com *duty-cycle* de 50%. Fonte: (BRAGA, 2003).

O que define este valor de tensão média é a proporção entre os tempos t_1 e t , conforme a figura 16. Referido como ciclo ativo ou *duty-cycle*, esta proporção pode variar de 0%, que seria um sinal totalmente desligado, com tensão em 0V e 100%, que seria um sinal sempre ligado, com tensão máxima. Na figura 17, é possível observar dois casos em que o *duty-cycle* é de 1% e 99% e o valor médio atingido.

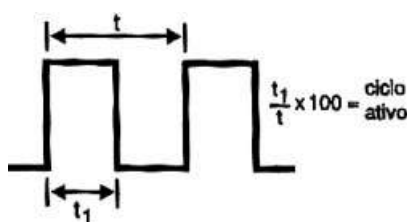


Figura 16 – Definição de *duty-cycle*. Fonte: (BRAGA, 2003).

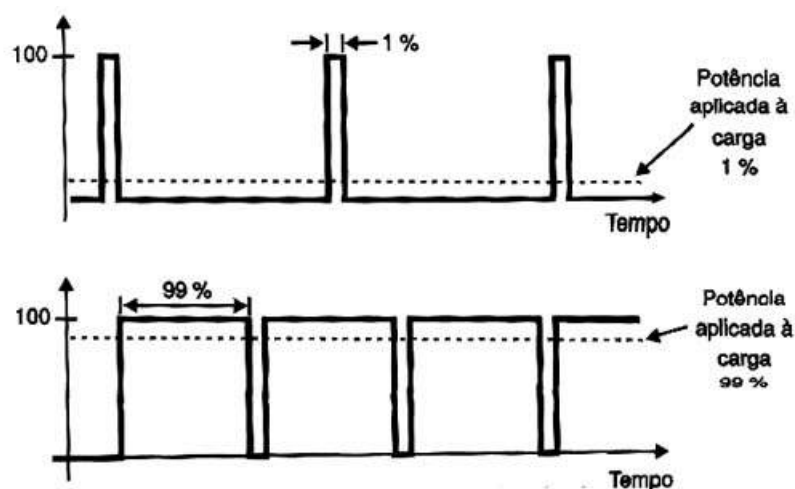


Figura 17 – *Duty-cycle* de 1% e 99%. Fonte: (BRAGA, 2003).

Para obter-se um sinal senoidal a partir de um sinal PWM é necessário que o duty-cycle varie rapidamente afim de obter um valor médio variante no tempo. Essa abordagem é muito utilizada em inversores de frequência, que geralmente modulam o sinal do barramento CC em um sinal CA conectado à rede elétrica, normalizado de acordo com as regras de cada país. (SALIM; KAPROWI; SAMAT, 2017). Na figura 18, observa-se o sinal senoidal modulado em PWM.

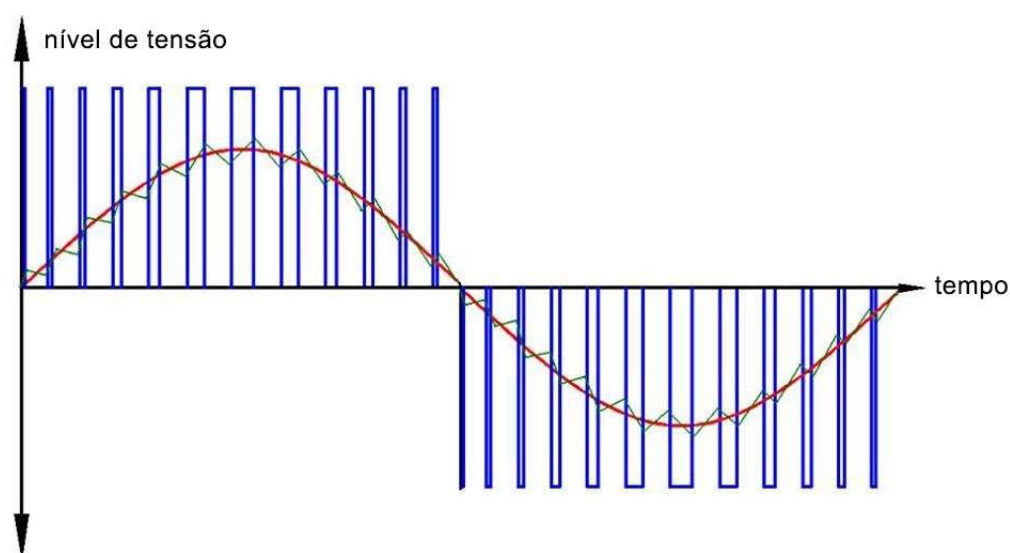


Figura 18 – PWM Senoidal, com *duty-cycle* variável. Fonte: (BRAGA, 2003).

Entre as técnicas mais utilizadas para implementação do PWM senoidal existem duas que mais se destacam: SPWM, *Sinusoidal Pulse Width Modulation* e o SVPWM, *Space Vector Pulse Width Modulation*. Neste trabalho é abordado o SPWM como uma estratégia consolidada no controle de motores e inversores trifásicos.

2.2.1 PWM Senoidal

A técnica mais básica de implementação contemplada neste trabalho é a modulação SPWM. Ela funciona baseada na comparação de um sinal portador, com o formato de onda desejado na saída, realizando uma comparação com o sinal triangular de alta frequência, segundo (ROCHA, 2014). A figura 19, mostra o resultado da operação de comparação entre uma parte de uma onda senoidal (portadora) e o sinal de referência triangular (moduladora), assim como o sinal de saída do PWM.

Vale ressaltar na figura 19 os pontos de intersecção entre o sinal da portadora e da moduladora. Toda vez que o sinal da portadora tem seu módulo maior do que o sinal da moduladora, o PWM estará em nível alto e para o caso contrário, com o módulo da portadora menor do que ao sinal da moduladora, a saída será em nível baixo.

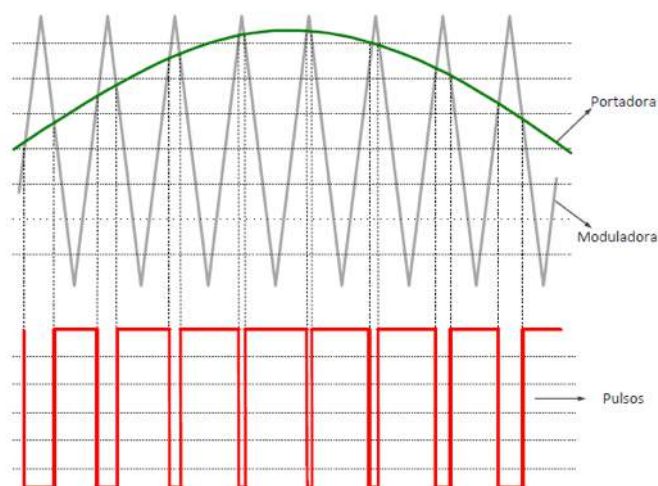


Figura 19 – Comparação entre a moduladora e portadora. Fonte: (ROCHA, 2014).

2.2.2 SVPWM

A técnica SVPWM vem tomando espaço cada vez maior nos controles dos conversores de potência, isto devido ao fato de que ela se baseia em um vetor espacial obtida através de um sinal de referência, que determina os períodos em que as chaves, comumente IGBTs, alteram os seus estados. Isto reflete na minimização de harmônicos nas tensões de saída e permite atingir uma maior frequência de chaveamento proveniente de maiores índices de modulação. (BATISTA et al., 2006)

Os inversores trifásicos têm em sua estrutura três ramos que separam as tensões A, B e C. Em cada ramo deste, há dois componentes que fazem a comutação com o intuito de gerar o sinal senoidal final na saída do inversor (SILVEIRA, 2017). Conforme observado nas figuras 13 e 14, em cada lado do conversor (retificador e inversor), podem existir até 6 componentes semicondutores, que podem gerar até 8 possibilidades de chaveamento. Na tabela 1 abaixo são abordados somente três chaves S1, S3 e S5, tendo em vista que as outras (S2, S4 e S6) são complementares às primeiras.

Tabela 1 – Possibilidades de chaveamento do Inversor

Vetor	S1	S3	S5
0	Fechado	Fechado	Fechado
1	Aberto	Fechado	Fechado
2	Aberto	Aberto	Fechado
3	Fechado	Aberto	Fechado
4	Fechado	Aberto	Aberto
5	Fechado	Fechado	Aberto
6	Aberto	Fechado	Aberto
7	Aberto	Aberto	Aberto

Baseado na transformada de Clark, converte-se os sinais trifásicos em outros dois

sinais V_α e V_β , que são utilizados para determinar o período de cada sinal PWM na saída, essa transformada é observada na equação 2.5.

$$V = \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 2v_a - (v_b + v_c) \\ \sqrt{3}(v_b - v_c) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

No sistema de coordenadas $\alpha\beta$, após a conversão dos sinais trifásicos, dois vetores dos oito são nulos (vetor 0 e vetor 7), então restam outras 6 que geram um ângulo de 60° entre si, formando 6 setores. Estes vetores podem ser representados conforme figura 20.

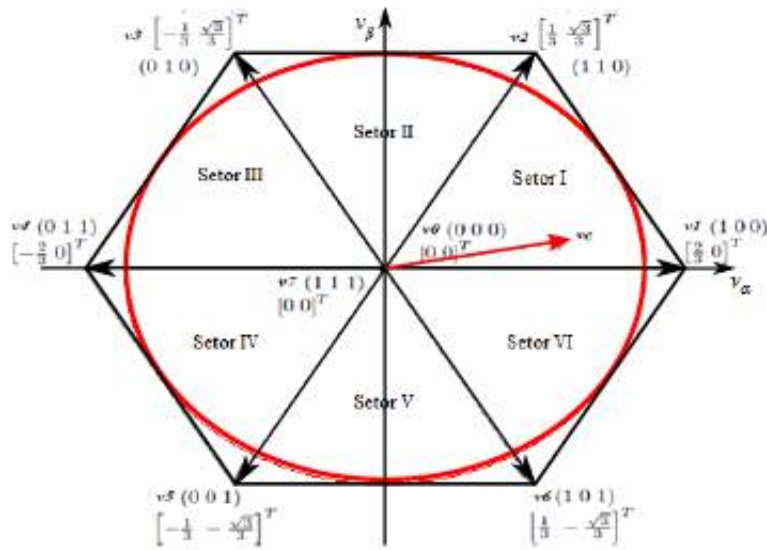


Figura 20 – Vetores Espaciais. Fonte: (SILVEIRA, 2017).

No domínio $\alpha\beta$, o módulo dos vetores estão descritos na tabela 2, pela transformada de Clark, como explicitado por (SILVEIRA, 2017). Os módulos são utilizados para definir a ordem de chaveamento e irão permitir calcular o período de cada uma das chaves que controlam o inversor. Para saber em qual setor se encontra o fasor, utiliza-se do teste de magnitude mínima, no qual um sinal de referência é utilizado para determinar o ângulo e a fase do mesmo.

De acordo com (NAZLEE et al., 2010), os tempos de chaveamento de cada sinal podem variar conforme as tensões α e β . Na tabela 3, usa-se um sinal T que é a frequência de amostragem multiplicado pelos vetores espaciais calculados através do setor em que se encontra o sinal portador. Esta tabela é utilizada na aplicação do algoritmo SVPWM utilizado neste trabalho.

Tabela 2 – Módulo dos Vetores de Comutação do domínio $\alpha\beta$. Fonte: (SILVEIRA, 2017)

Vetor	$v\alpha$	$V\beta$
0	0	0
1	$\frac{2}{3}$	0
2	$\frac{1}{3}$	$\frac{\sqrt{3}}{3}$
3	$-\frac{1}{3}$	$\frac{\sqrt{3}}{3}$
4	$-\frac{2}{3}$	0
5	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{\sqrt{3}}{3}$
6	$\frac{1}{3}$	$-\frac{\sqrt{3}}{3}$
7	0	0

Tabela 3 – Tempo de Chaveamento de cada vetor. Fonte: (NAZLEE et al., 2010)

Setor	Braços Superiores (S1, S3 e S5)	Braços Inferiores (S2, S4 e S6)
1	$S1 = Tv1 + Tv2 + (Tv7)/2$ $S3 = Tv2 + (Tv7)/2$ $S5 = (Tv7)/2$	$S2 = (Tv0)/2$ $S4 = (Tv0)/2 + Tv1$ $S6 = (Tv0)/2 + Tv1 + Tv2$
2	$S1 = Tv2 + (Tv7)/2$ $S3 = Tv3 + Tv2 + (Tv7)/2$ $S5 = (Tv7)/2$	$S2 = Tv3 + (Tv0)/2$ $S4 = (Tv0)/2$ $S6 = Tv2 + Tv3 + (Tv0)/2$
3	$S1 = (Tv7)/2$ $S3 = Tv3 + Tv4 + (Tv7)/2$ $S5 = Tv4 + (Tv7)/2$	$S2 = Tv3 + Tv4 + (Tv0)/2$ $S4 = (Tv0)/2$ $S6 = Tv3 + (Tv0)/2$
4	$S1 = (Tv7)/2$ $S3 = Tv4 + (Tv7)/2$ $S5 = Tv5 + Tv4 + (Tv7)/2$	$S2 = Tv4 + Tv5 + (Tv0)/2$ $S4 = Tv5 + (Tv0)/2$ $S6 = (Tv0)/2$
5	$S1 = Tv6 + (Tv7)/2$ $S3 = (Tv7)/2$ $S5 = Tv5 + Tv6 + (Tv7)/2$	$S2 = Tv5 + (Tv0)/2$ $S4 = Tv5 + Tv6 + (Tv0)/2$ $S6 = (Tv0)/2$
6	$S1 = Tv1 + Tv6 + (Tv7)/2$ $S3 = (Tv7)/2$ $S5 = Tv6 + (Tv7)/2$	$S2 = (Tv0)/2$ $S4 = Tv1 + Tv6 + (Tv0)/2$ $S6 = Tv1 + (Tv0)/2$

Na literatura que aborda SPWM, encontra-se resoluções com diferentes métodos de execução, simulação de algoritmos mais rápidos e eficazes de serem aplicados. Execução em geral são voltadas para DSPs (*Digital Signal Processor*) e microcontroladores em controle de motores trifásicos e inversores de potência. Dois artigos fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho são voltados para as placas Arduíno. Em (MWINYIWIWA; WOLANSKI; OOI, 1997), é discutida a metodologia utilizada pelos autores para a concepção de um algoritmo com deslocamento de fase, otimizando o tempo de execução do algoritmo voltado para controladores de menor poderio de processamento. Já (ZULKIFLI; HUSSIN; SAAD, 2014) aborda um Arduino como uma plataforma de desenvolvimento de baixo custo para controle de um inversor. Neste último, apresenta-se os resultados laboratoriais obtidos na implementação de baixo custo em uma plataforma similar à explorada neste trabalho.

2.3 Considerações Finais

Neste capítulo foram abordados os elementos que compõem todo o SCEE. Descrever os modelos de cada um dos componentes é relevante para a concepção de conhecimento sobre a tecnologia utilizada na plataforma, além de deixar propostas de mudanças para estudos comparativos futuros. Visando a implementação e aplicação das teorias de controle se torna o cerne da concepção laboratorial o inversor de frequência, componente do conversor de potência. Alinhado ao principal objetivo do trabalho, o capítulo 3 descreve os principais componentes deste arranjo e o desenvolvimento das teorias de controle aplicadas ao microcontrolador.

3 Desenvolvimento

Neste capítulo, aborda-se os elementos gerais presentes na bancada montada e o desenvolvimento das estratégias de controle, almejando explicitar o seu funcionamento, as suas configurações, propriedades e características. Divide-se em duas seções, a primeira demonstrará os componentes do sistema geração e controle, já na segunda seção, temos a implementação da estratégia de controle.

3.1 Elementos da Bancada

O sistema de aquisição de dados e controle é desenvolvido conforme a proposta abordada por MENDES (2009). Contudo, neste primeiro momento, foi elaborado uma versão mais simples do sistema, visando o controle do inversor por uma estratégia em malha aberta. Este sistema é composto por 8 elementos principais: Varivolt, Retificador a Diodo, Fonte DC, Inversor de Frequência, Placa de Interface com o Microcontrolador, o Microcontrolador, Filtro Indutivo e Circuito de Carga

Observa-se na figura 21, que explicita as conexões entre os módulos.

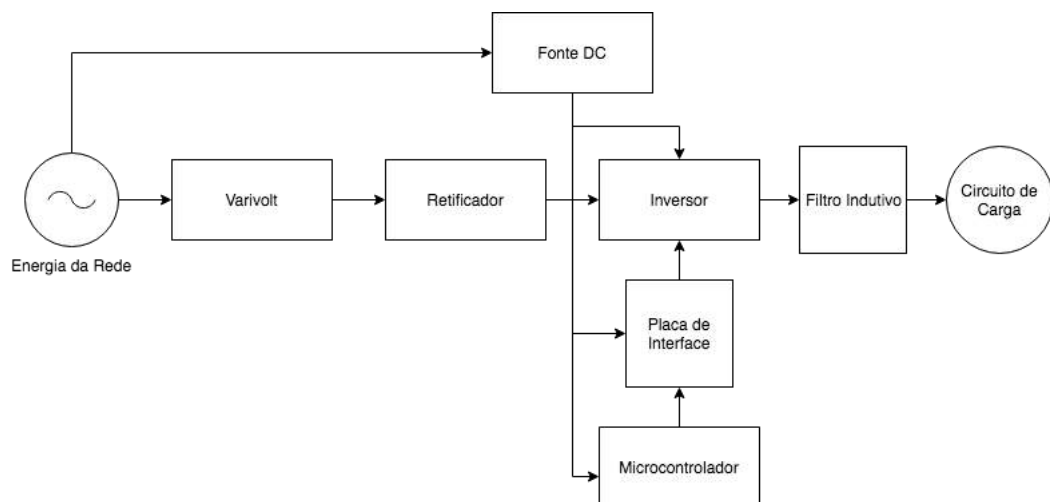


Figura 21 – Esquemático do Sistema.

3.1.1 Varivolt

No sistema, o Varivolt tem a função de emular a tensão de saída do gerador da turbina. O Varivolt é um dispositivo que faz a mesma função que um transformador, porém, tem a possibilidade de realizar o ajuste do número de espiras através de uma peça rotatória. A entrada

do componente recebe a tensão AC advindo da rede elétrica e permite gerar na saída uma tensão senoidal trifásica.

O modelo utilizado nesta bancada de testes é o TDGC2-3, produzido pela JNG, observado nas figuras 22 e 23. Com uma tensão nominal de entrada para 220V, ele possui uma potência de 3kVA e pode gerar uma onda senoidal de 0 a 250V na saída, com uma corrente máxima de 12A. Segundo manual do fabricante, é indicado não permanecer com o mesmo ligado durante muito tempo, devido a sobreaquecimento e dano aos enrolamentos. A resistência de isolamento dele é de $2M\Omega$ e tem uma rigidez elétrica de 1500V/min.



Figura 22 – Imagem superior do varivolt utilizado na bancada.

3.1.2 Retificador a Diodo

O retificar a diodo compõe a primeira parte do conversor de potência. A função do retificador é transformar o sinal trifásico alternado em um sinal de corrente contínua, o qual será tratado no inversor de frequência. O retificar a diodo é composto por 6 diodos de potência, conforme mostrado na figura 13. Este elemento da bancada, figura 24, é comumente ligado à saída do gerador. Neste trabalho, está conectado ao dispositivo que emula a tensão produzida no gerador, o varivolt.

3.1.3 Fonte DC

Foi elaborada uma fonte DC simétrica com +15V e -15V, para alimentação do inversor de frequência, microcontrolador e placa de interface do microcontrolador. Esta placa segue o seguinte diagrama da figura 25. O circuito montado possui uma corrente máxima de saída de 2A, suficiente para manter o sistema de controle energizado. A fonte DC montada foi montada em uma placa de circuito conforme a figura 26.



Figura 23 – Imagem frontal do varivolt utilizado na bancada.

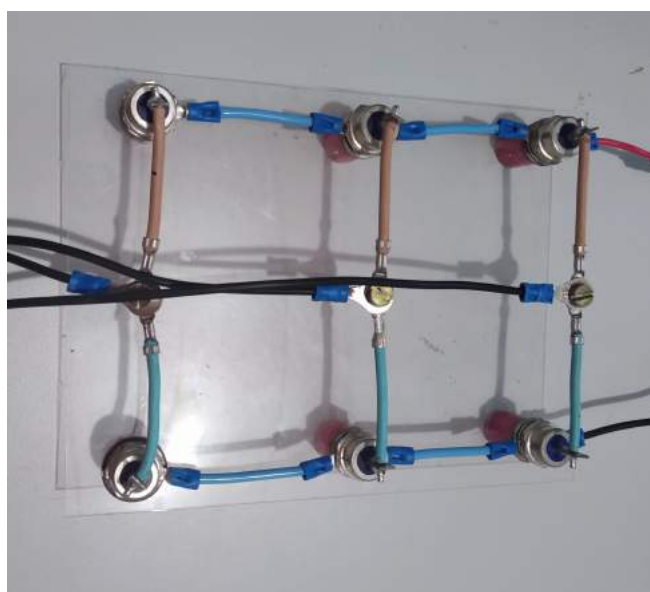


Figura 24 – Retificador utilizado na bancada.

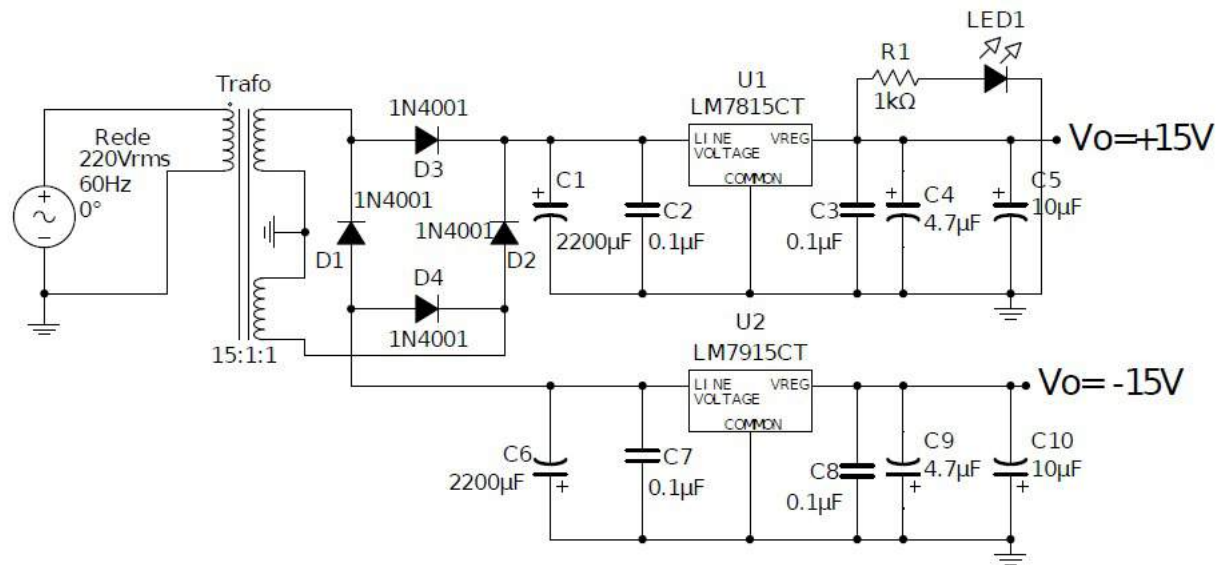


Figura 25 – Esquema de fonte simétrica +15V e -15V para alimentação do sistema de controle.

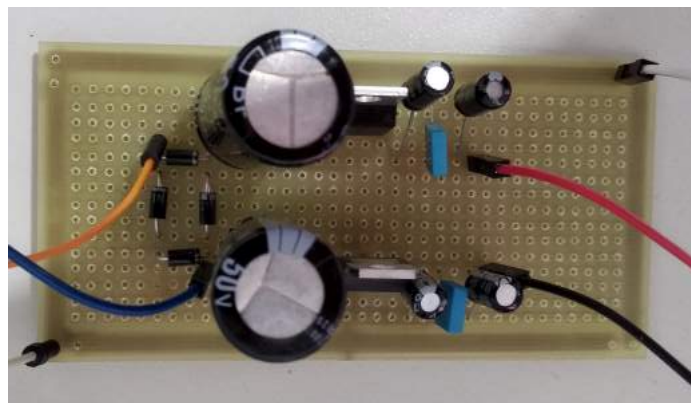


Figura 26 – Fonte simétrica +15V e -15V para alimentação do sistema de controle.

3.1.4 Inversor de Frequência

O inversor de frequência utilizado na bancada foi o modelo SPCIT 1000-80-20, o qual tem uma potência nominal de 10KVA. As informações do inversor seguem na tabela 4.

O inversor, conforme figura 27, ainda possui 3 módulos de *driver* que é responsável pelo acionamento dos IGBTs dos braços do inversor, eles necessitam de uma entrada de 15V para ativação. Ambos suportam uma frequência máxima de chaveamento na casa de 100KHz. Os capacitores do barramento CC são de 470 μF e suportam uma tensão máxima de 450V. Todo o material de referência pode ser encontrado no site do fornecedor (*Supplier*), com maiores informações referentes aos módulos do inversor.

Tabela 4 – Informações retiradas do *Datasheet* do Inversor

Parâmetro	Valor Nominal
Modelo	SPCIT 1000-80-20
Tensão de Alimentação	$\pm 15V$
Tensão Máxima do Barramento	800 Vcc + 10%
Frequência Máxima de Chaveamento	20kHz
Potência Nominal	10KVA
Tensão de Saída	0-380Vrms
Frequência de Saída	30-150Hz
Corrente Máxima de Saída (10KHz)	15,2 A
Corrente Máxima (15KHz)	13,7 A
Corrente Máxima (20KHz)	9,3 A

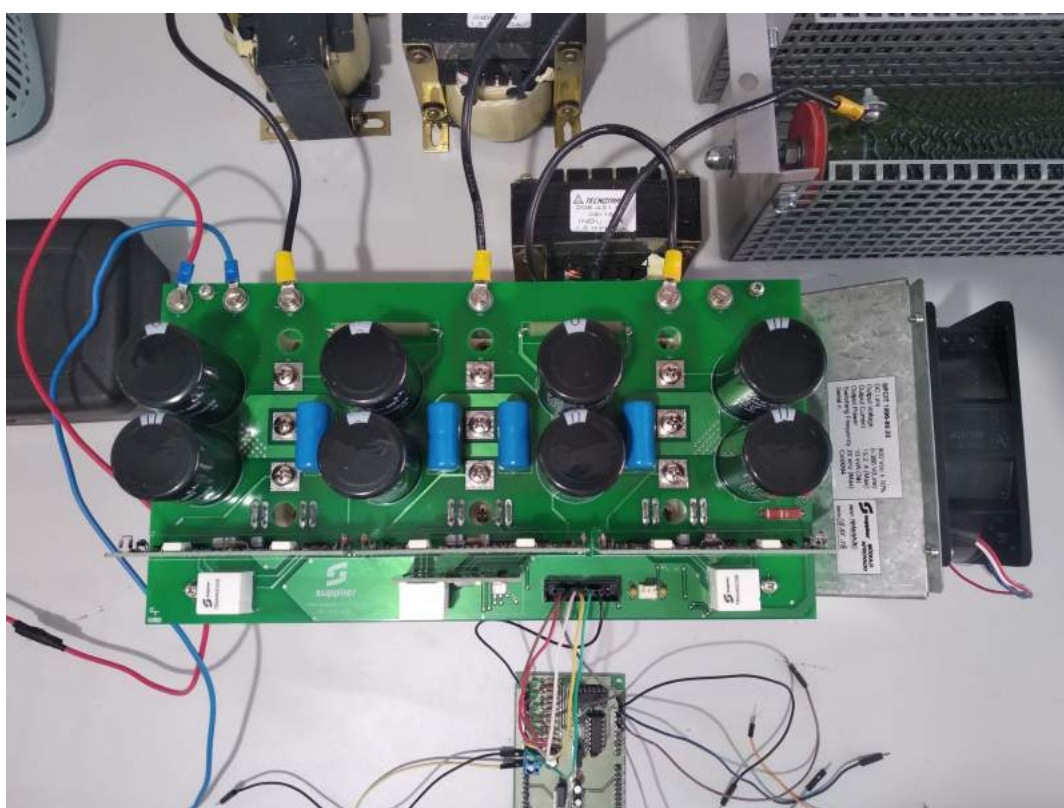


Figura 27 – Inversor de Frequência SPCIT 1000-80-20

3.1.5 Interface com o Microcontrolador

As saídas do microcontrolador tem uma tensão diferente da necessária no gate-drive no inversor. Enquanto a tensão do controlador é de 5V, o inversor necessita de uma tensão de 15V. Foi utilizado então um conversor *TTL-CMOS*, figura 28, que faz o trabalho de conversão do sinal de tensão de 3.3V a 5V para uma tensão de 15V necessária na entrada do inversor. A placa possui 6 pinos que fazem a elevação da tensão e outros 6 pinos que fazem o abaixamento. Utilizou-se somente os pinos de elevação, de modo que o microcontrolador não realizava a leitura de sensores.

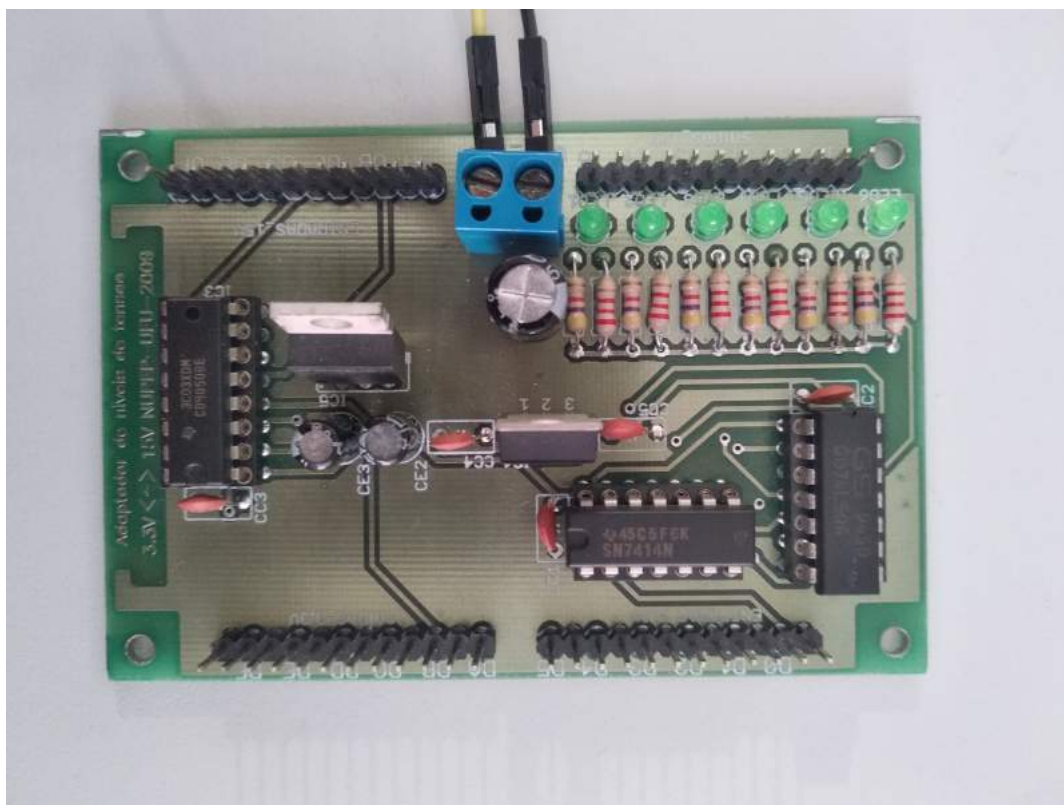


Figura 28 – Placa de interface entre o microcontrolador e o inversor de frequência.

3.1.6 Microcontrolador Arduino Mega

O Arduino Mega é uma plataforma *open-hardware*, desenvolvido pela comunidade e projeto homônimo, Arduino, feito principalmente com o intuito de ter baixo custo e ser acessível, baseada no microcontrolador da AVR, o *ATmega 2560*.

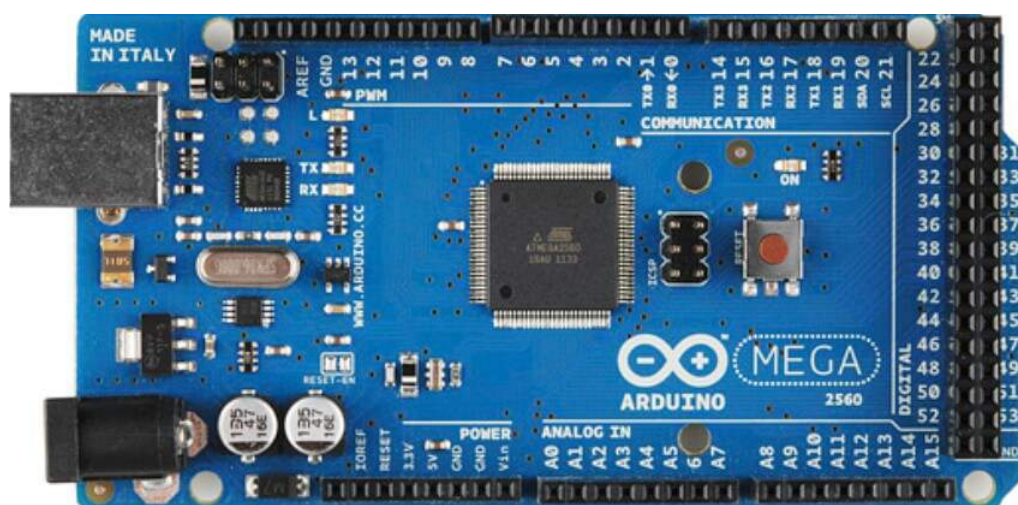


Figura 29 – Arduino Mega, com processador *ATmega2560*

A placa de desenvolvimento possui 54 pinos digitais, podendo ser setados como entrada ou saída. Existem 13 pinos destes que já possuem recursos para saída PWM e outros 16 que têm entradas analógicas, com conversores de 10 bits. A placa já tem um oscilador de 16MHz, que serve como base para o seu processamento, tem reguladores de tensão para entradas de 7V a 12V. Cada pino com corrente de 40mA de saída.

O *ATmega 2560* tem suporte às comunicações *UART*, *SPI* e *I2C*, e a placa pode ser programada nas linguagens C e C++. Há memória *Flash*, de 128kB, das quais 4kB são dedicadas ao *bootloader*, *SRAM* de 8kB e *EEPROM* de 4kB, há interface *JTAG* e, em condições nominais, executa 1 *MIPS* por segundo.

3.1.7 Filtro Indutivo e Circuito de Carga

O filtro utilizado neste arranjo laboratorial é do tipo indutivo, com o objetivo de obter uma menor distorção do sinal decorrente dos harmônicos de alta frequência do chaveamento dos *IGBTs*. É composto por 3 indutores, um por fase, com indutância de $1.5mH$, cada. Somados aos resistores, figura 30, cada um com 100Ω de resistência, compõe o circuito de carga do sistema de conversão.

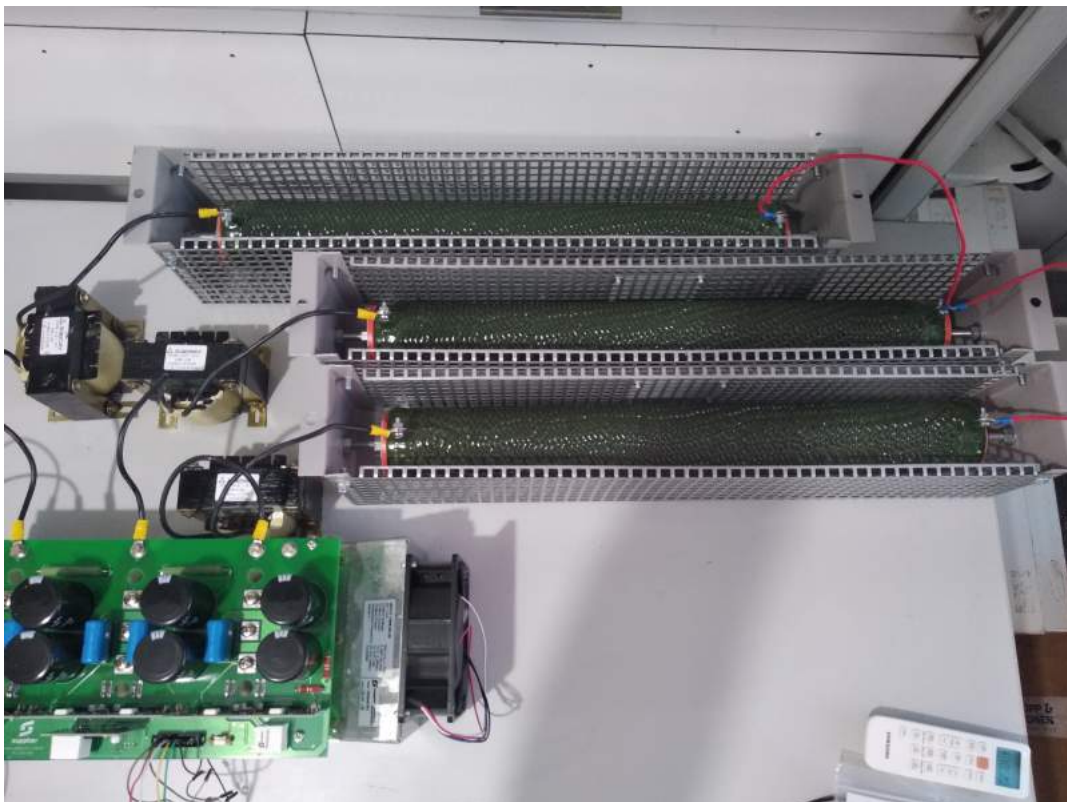


Figura 30 – Circuito de indutores em série com os resistores de potência

3.2 Estratégia de Controle Implementada

3.2.1 PWM Senoidal

O microcontrolador da AVR, o *ATmega2560*, possui 2 tipos de timers, de 8 bits e de 16 bits, a serem configurados e permitem ao desenvolvedor utilizar do hardware para realizar as operações de divisão de *clock* e ajuste de *duty-cycle*. Para a estratégia do PWM Senoidal, optou-se por realizar a comparação entre os sinal senoidal e a onda triangular com o auxílio do contador de 16 bits do microcontrolador.

Para realizar esta operação sem consumir um tempo considerável a fim de calcular os valores do seno, utilizou-se de vetores gerados na inicialização do microcontrolador. Calculando o período discreto da onda, a partir da equação 3.1, divide-se um meio período de onda em um número pré-determinado de amostras armazenadas no vetor, isto a partir da iteração da equação 3.2. Este valores serão posteriormente utilizados para comparação com a onda portadora.

$$period = \frac{f_{micro}}{f * SinDivisions} \quad (3.1)$$

$$X_n = Ms * \sin\left(\frac{(n + 0.5) * 2 * \pi}{SinDivision}\right) * period \quad (3.2)$$

Existem três parâmetros no código que permitem alteração e obtenção de um resultado ótimo. O número de amostras da onda senoidal (*SinDivisions*) define a frequência em que o PWM irá ter. A frequência da senoide portadora, com valor de 50Hz ou 60Hz. E por fim, o ganho *Ms* da onda senoidal, que define o coeficiente de modulação utilizado no SPWM. No capítulo 4, pode ser melhor analisado os resultados obtidos a partir da variação destes parâmetros.

O timer é programado com as seguintes especificações: funciona no modo *Fast PWM*, este modo gera uma onda dente-de-serra, conforme figura 31, que será utilizada para comparação com a onda senoidal armazenada na LUT (*Look-up Table*). Não é realizada a divisão de *clock*, ou seja, sem *prescaler*, o que nos leva a ter uma frequência de *clock* de aproximadamente $6,25nS$. Três *timers* são utilizados, um para cada fase. Quando cada fase atinge um ponto maior do que a onda senoidal, isto é, quando é feita a comparação entre os dois e constata-se que o sinal da senoide é maior do que a portadora, o sinal de saída nos pinos OC1A, OC3A e OC4A vão para nível lógico alto. Na tabela 5 seguem as seguintes relações com os pinos do Arduino. A cada período, definido a partir da equação 3.1, uma interrupção é habilitada para que o microcontrolador atualize os valores do *duty-cycle* baseado nos valores da LUT.

Na interrupção, seis *flags* são utilizadas. Três delas são recursos para que haja um *toggle* do pino de saída, de forma a realizar o chaveamento dos braços inferiores do inversor.

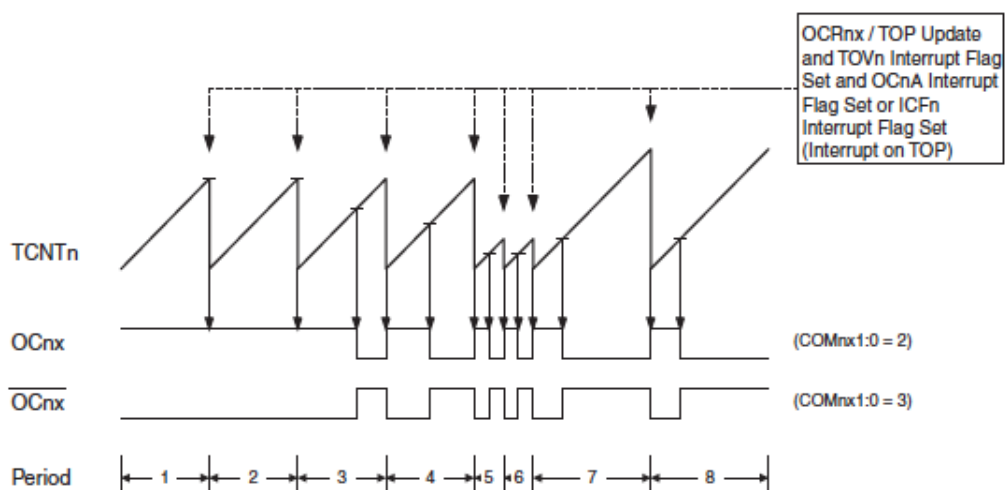


Figura 31 – Onda dente-de-serra gerada pelo hardware do *ATmega2560*. Fonte: (MICROCHIP, 2014).

Tabela 5 – Pinos utilizados no Arduíno e nome utilizado no microcontrolador. Fonte: (MICROCHIP, 2014).

Nome do Pino	Nome Mapeado
Digital Pin 11	OC1A
Digital Pin 12	OC1B
Digital Pin 5	OC3A
Digital Pin 2	OC3B
Digital Pin 6	OC4A
Digital Pin 7	OC4B

Os pinos OC1B, OC3B e OC4B então realizam as mesmas comparações que os três pinos que controlam o IGBTs superiores do inversor. Os outros bits de sinalização são utilizados para realizar a defasagem entre as fases senoidais. É aberta uma contagem de aproximadamente $5,55ms$, que refletem em uma defasagem de 120° entre os sinais. Ao fim da interrupção, os valores de *duty-cycle* são atualizados.

O código base desenvolvido para esta técnica de controle se encontra nos anexo A, assim como os resultados obtidos podem ser observados no capítulo 4.

4 Resultados

Neste capítulo é apresentado os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais baseados na variação dos parâmetros de controle, consolidando a estratégia implementada. As respostas obtidas foram retiradas com o auxílio do osciloscópio *Minipa MVB DSO* e as informações são analisadas qualitativamente pela forma de onda na saída do inversor. Nos resultados também é validada a influência do coeficiente de modulação e o número de amostras, visualizando o comportamento do inversor sobre determinadas condições. As imagens retiradas do equipamento possuem no eixo das abscissas o tempo e no eixo das coordenadas a tensão.

4.1 Ensaios com o microcontrolador

Previamente, foi realizado um ensaio para validação dos sinais na saída do microcontrolador. O objetivo neste teste era obter um sinal PWM que apresentasse uma saída de 60Hz, com dois semiciclos de onda senoidal, defasados de 120° . Neste primeiro teste o resultado apresentado pode ser observado na figura 32. Com uma defasagem de aproximadamente 5.55 ms, o necessário para defasar a onda senoidal trifásico, o resultado obtido se aproxima bastante do requisitado.

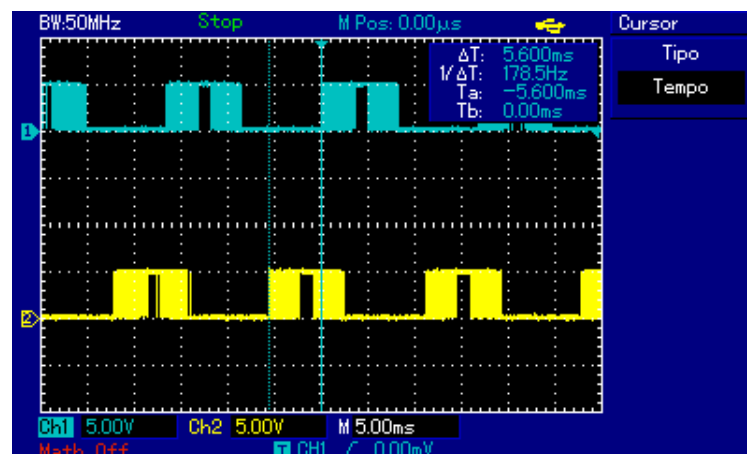
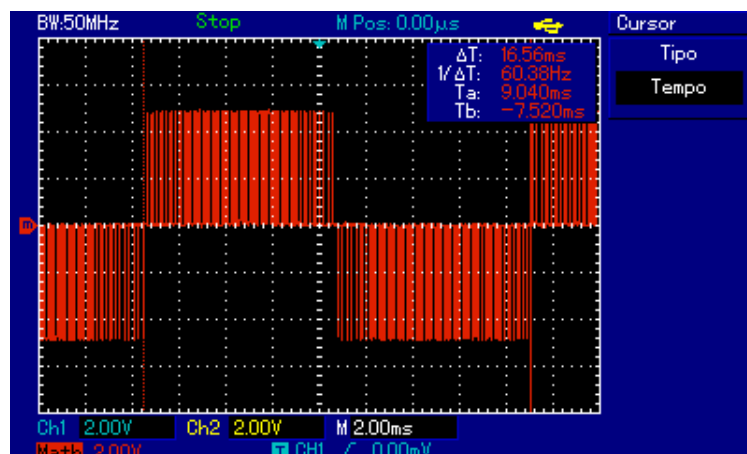
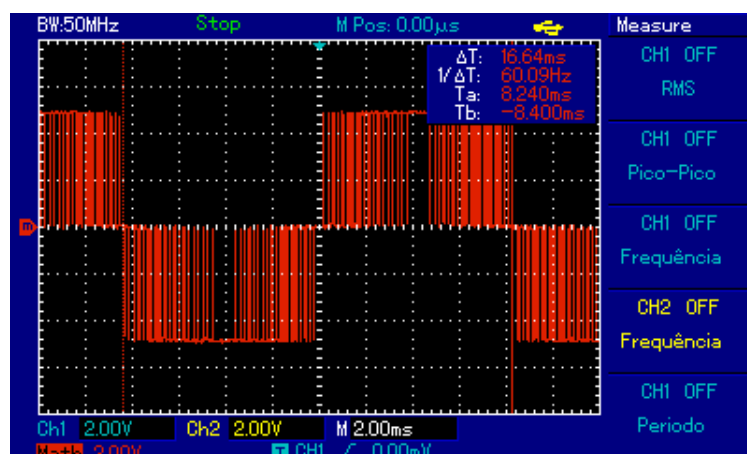
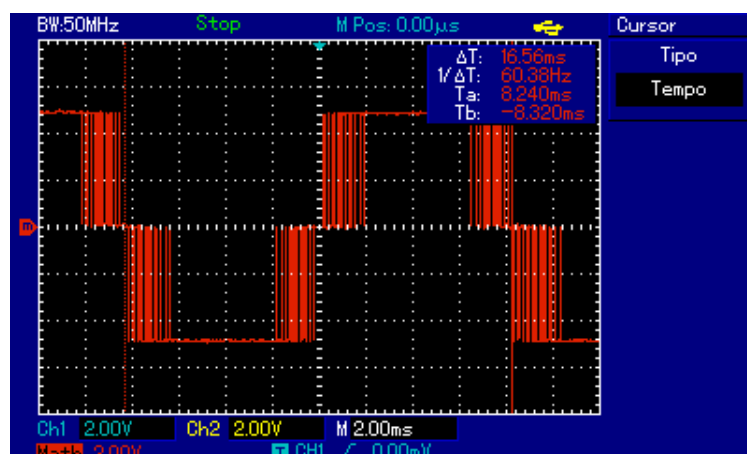


Figura 32 – Imagem dos semiciclos defasados de 120°

Foi feita também uma análise acerca do efeito do coeficiente de modulação na onda senoidal. Observa-se que o aumento do coeficiente de modulação gera uma comparação mais tardia, desta forma a comparação pode entrar em uma zona de submodulação ou supermodulação. Nas figuras 33, 34 e 35 são os resultados retirados da saída do microcontrolador que reflete o aumento da modulação.

Também realizou-se a variação do número de amostras do sinal. As figuras 36 e 37 complementam a figura 34 quanto à este caso. Com a variação da frequência, o sinal possui

Figura 33 – Saída do microcontrolador com $M_s = 0.5$ Figura 34 – Saída do microcontrolador com $M_s = 1.0$ Figura 35 – Saída do microcontrolador com $M_s = 1.5$

uma melhor caracterização, tendo em vista que quando a taxa de amostragem aumenta, o sinal digital é modulado com maior fidelidade ao sinal analógico.

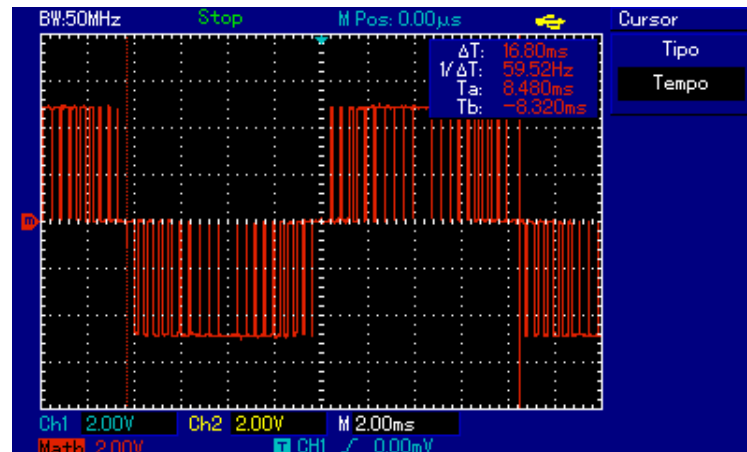


Figura 36 – Saída PWM com frequência de 2.5kHz

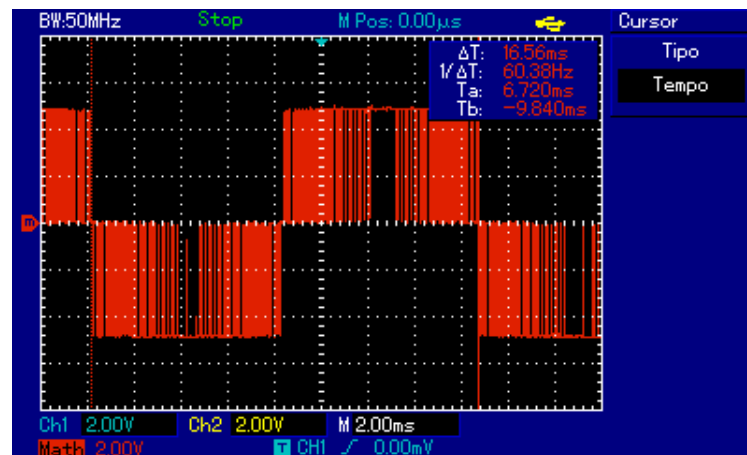


Figura 37 – Saída PWM com frequência de 7.5kHz

4.2 Ensaios realizados no inversor

No inversor também foram feitos os mesmos ensaios. Varia-se o coeficiente de modulação, com o intuito de validar o comportamento do sistema nas áreas de operação. Depois varia-se a frequência de amostragem para validar a onda senoidal. Sobre as mesmas condições, realizou-se o ensaio diretamente no inversor de frequência. Todas as medidas foram feitas com uma tensão no barramento CC de aproximadamente 230V.

Para o primeiro ensaio, utiliza-se uma frequência fixa de chaveamento de aproximadamente 5kHz, baseado no número de 84 amostras da onda senoidal, então, realiza-se a variação do coeficiente de modulação (M_s). As figuras 38, 39 e 40 são os resultados obtidos para um coeficiente de 0.5, 1.0 e 1.5, respectivamente.

Observa-se que o efeito do aumento do coeficiente de modulação resulta em uma onda mais contínua do que as ondas com o menor coeficiente. Isto se deve a fato da comparação entre o sinal e a portadora demorar um pouco mais para acontecer do que quando o fator M_s é baixo.

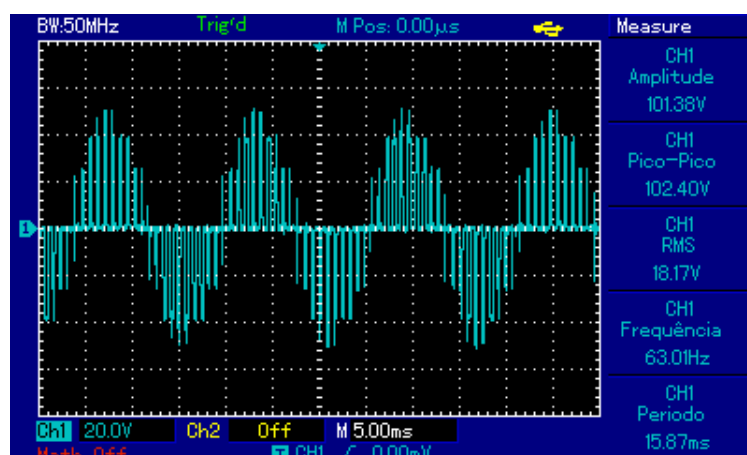


Figura 38 – Tensão na saída do inversor, frequência de chaveamento de 5kHz e $M_s = 0.5$

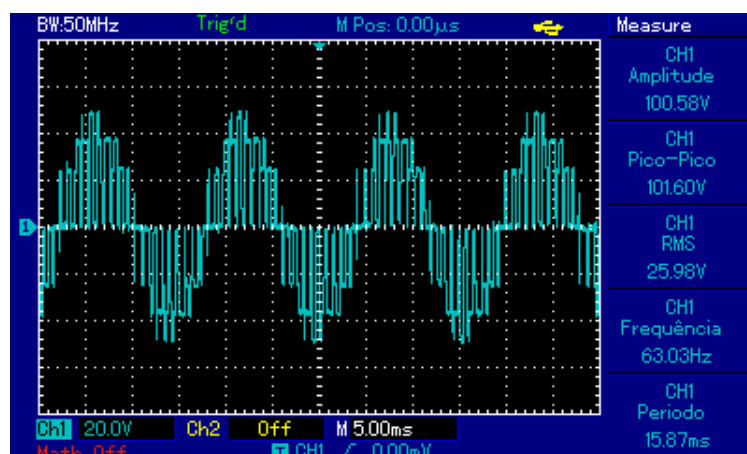


Figura 39 – Tensão na saída do inversor, frequência de chaveamento de 5kHz e $M_s = 1.0$

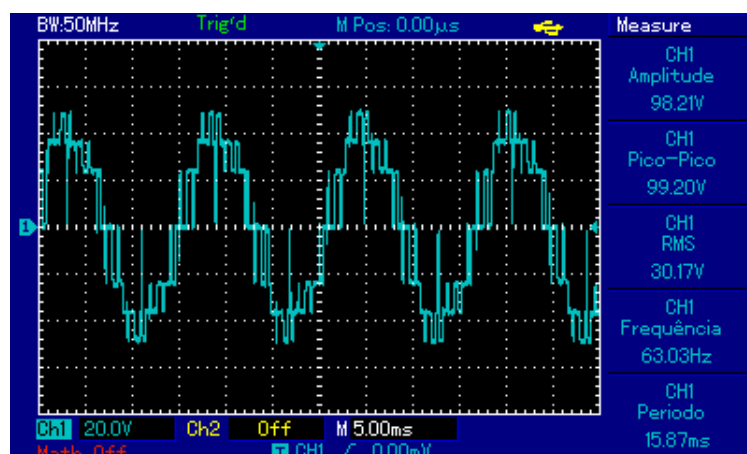


Figura 40 – Tensão na saída do inversor, frequência de chaveamento de 5kHz e $M_s = 1.5$

O segundo ensaio laboratorial no inversor executado foi realizar a variação do número de amostras da onda senoidal. Com 42 amostras, a frequência de chaveamento do PWM também cai pela metade, atingindo aproximadamente 2.5kHz. O resultado obtido com a diminuição do

número de amostras, figuras 41, 42, 43.

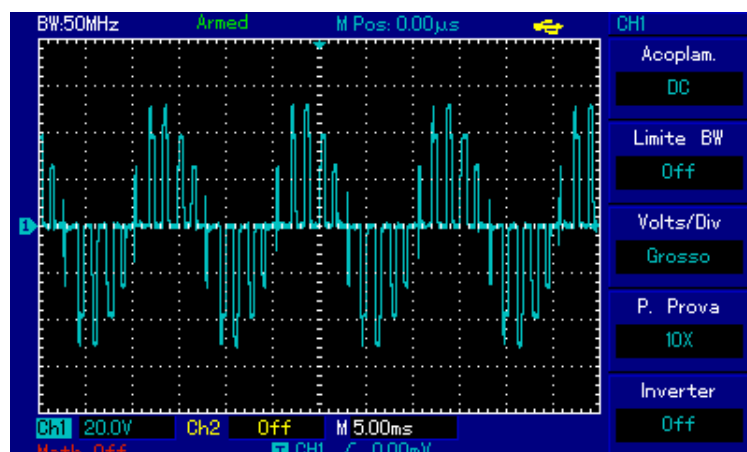


Figura 41 – Tensão na saída do inversor, frequência de chaveamento de 2.5kHz e $M_s = 0.5$

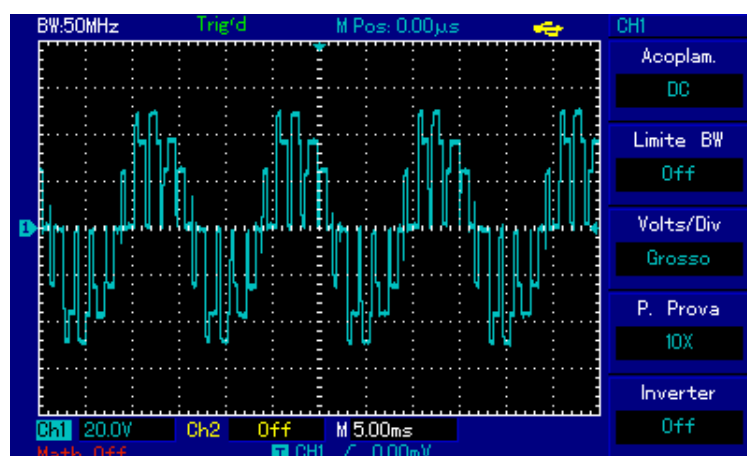


Figura 42 – Tensão na saída do inversor, frequência de chaveamento de 2.5kHz e $M_s = 1.0$

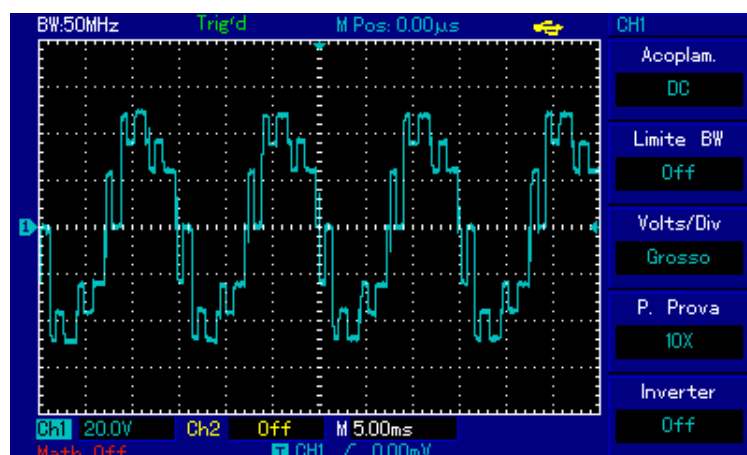


Figura 43 – Tensão na saída do inversor, frequência de chaveamento de 2.5kHz e $M_s = 1.5$

O terceiro ensaio laboratorial foi semelhante ao segundo ensaio. Contrário ao teste anterior, foi realizado um aumento do número de amostras. Desta vez, a onda senoidal possui

125 amostras, o que reflete em uma frequência de chaveamento de 7.5kHz. Em comparação aos testes anteriores, com coeficiente de modulação igual, constata-se que houve uma variação no sinal muito rápida, à qual seria necessário um filtro para que não acontecesse. No inversor, o sinal obtido apresentou uma forma de onda distorcida para os casos de coeficiente com o valor de 0.5 e 1.0, como na figura 44, 45, 46.

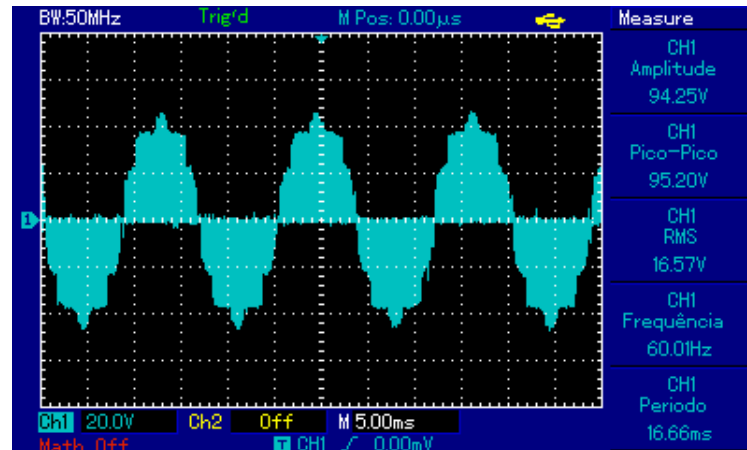


Figura 44 – Tensão na saída do inversor, frequência de chaveamento de 7.5kHz e $M_s = 0.5$

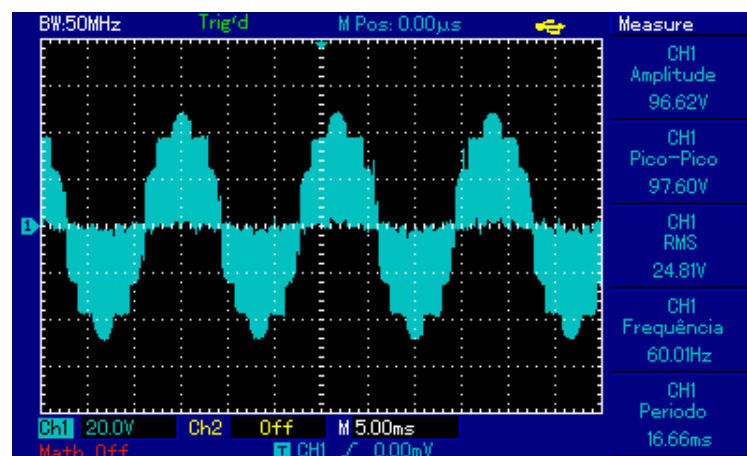


Figura 45 – Tensão na saída do inversor, frequência de chaveamento de 7.5kHz e $M_s = 1.0$

4.3 FFT dos Sinais

O osciloscópio permite gerar a Transformada Rápida de Fourier (FFT), a qual demonstra no domínio da frequência onde estão as principais frequências do sinal. Neste gráfico, observa-se a presença de harmônicos de alta frequência no sinal. Este problema poderia ser sanado com o auxílio de um filtro com uma configuração mais utilizada no mercado atual, como por exemplo os filtros RLC.

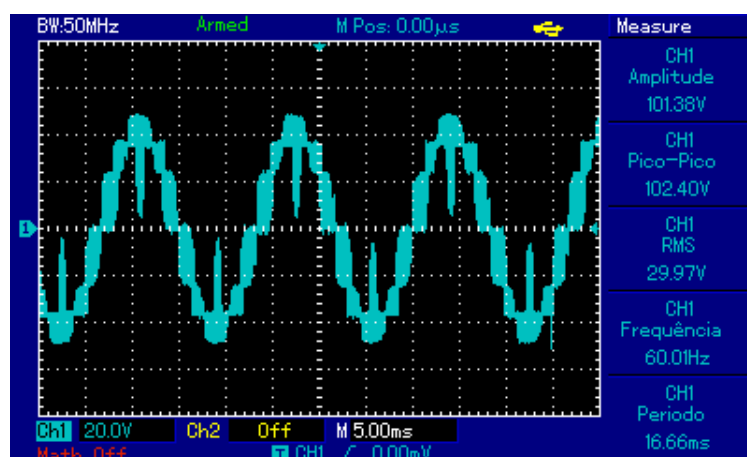


Figura 46 – Tensão na saída do inversor, frequência de chaveamento de 7.5kHz e $M_s = 1.5$

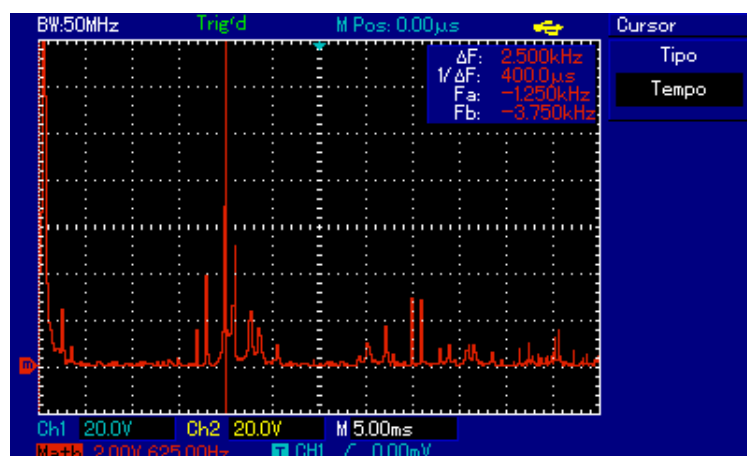


Figura 47 – Transformada de Fourier do sinal de saída do inversor, frequência de chaveamento de 2.5kHz e $M_s = 1.0$

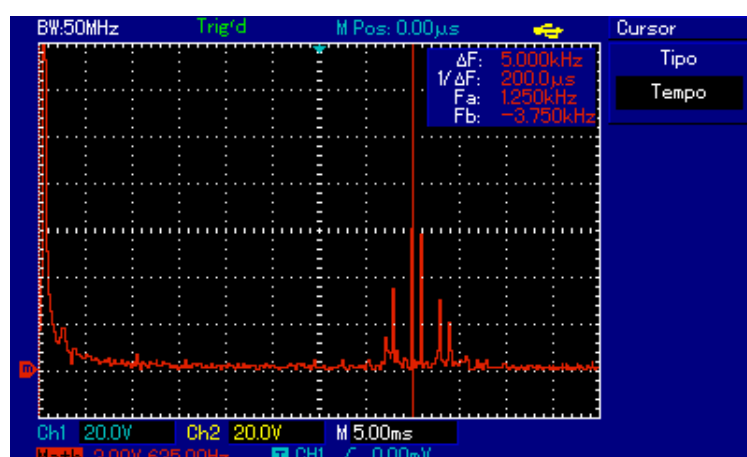


Figura 48 – Transformada de Fourier do sinal de saída do inversor, frequência de chaveamento de 5kHz e $M_s = 1.0$

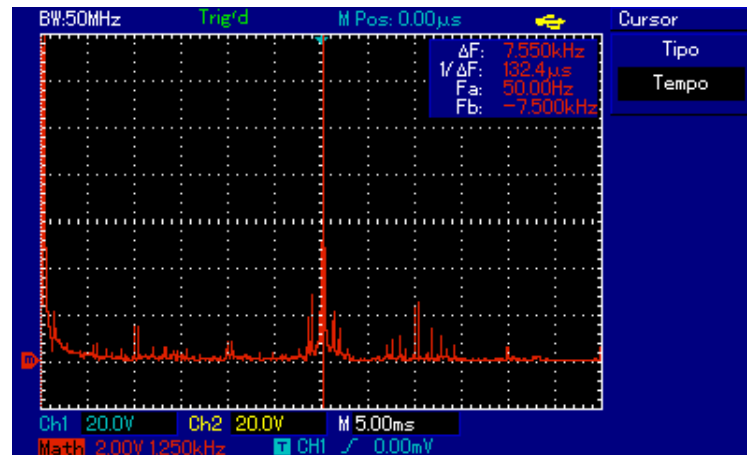


Figura 49 – Transformada de Fourier do sinal de saída do inversor, frequência de chaveamento de 7.5kHz e $M_s = 1.0$

4.4 Distorção Harmônica Total

Para efeito de comparação da qualidade do sinal obtido na modulação, pode-se estimar a Distorção Harmônica Total (DHT ou THD, do inglês) a partir da fórmula 4.1.

$$DHT = \sqrt{\sum_{h=2}^{50} \left(\frac{V_h}{V_1} \right)^2} \quad (4.1)$$

Os resultados obtidos são apresentados na tabela 6.

Tabela 6 – DHT obtidos com a FFT dos sinais de saída do inversor.

Frequência de Chaveamento	DHT
2,5 kHz	15,5 %
5 kHz	10,8 %
7,5 kHz	20,1 %

Entre as frequências do ensaio, o melhor resultado obtido quanto à DHT é com a frequência de 5kHz, com 10,8 %. Isto se deve ao fato de que o filtro utilizado possui uma frequência de corte estimada em 4kHz. Nas frequências de 2,5kHz e 7,5kHz o filtro não é efetivo, então aparecem mais harmônicas, principalmente próximas à frequência de chaveamento.

4.5 Considerações Finais

Os resultados obtidos nos ensaios, com variação do coeficiente de modulação e do número de amostras, refletem a implementação realizada na plataforma *Arduino Mega* que possui um baixo poder de processamento quando comparado à outros microcontroladores ou DSPs.

Identifica-se que com o aumento da taxa de chaveamento o comportamento do inversor é tornar a onda mais analógica, isto é, sem níveis definidos de tensão . A tensão de saída é de 95V a 100V. aproximadamente para o caso de 2.5kHz e 100V a 120V para as frequências de 5kHz e 7.5kHz. A frequência do sinal de saída fica em torno de 59 a 61 herts, mantendo-se dentro do padrão aceito.

A transformada de Fourier consolidada a presença de harmônicos de alta frequência, que podem ser filtrados em um futuro, caso a bancada possu um circuito de filtro passa-baixas com uma frequência de corte baixa, próxima aos 120°.

5 Conclusão

Este trabalho apresentou a elaboração de uma bancada de ensaios voltados à geração de energia eólica, principalmente para o estudo de técnicas de controle, assim como a implementação da estratégia de PWM Senoidal, ainda em malha aberta, com a finalidade de validar o funcionamento do SCEE.

No capítulo 1, foi feita uma breve introdução sobre a situação da energia eólica no Brasil e no Mundo, explicando também a organização e a metodologia científica aplicada a este trabalho, justificando as pesquisas na área, que são fundamentais para o incentivo à utilização de energias renováveis.

O referencial teórico, capítulo 2, foram abordados os assuntos fundamentais à geração de energia eólica. Os componentes do SCEE são primordiais para o entendimento do pleno funcionamento da bancada desenvolvida, já que os elementos presentes na plataforma, explicados no capítulo 3, são responsáveis pela emulação da geração de energia elétrica. Ainda neste capítulo 2, aborda-se a teoria do PWM Senoidal, estratégia escolhida para validar o funcionamento da plataforma.

O arranjo laboratorial foi reproduzido embasado no trabalho desenvolvido na tese SILVEIRA (2017), o que possibilita um grande leque de informações acerca dos componentes do sistema e seu funcionamento. A estratégia de controle é melhor esclarecida no capítulo 3 e expõe a construção do código desenvolvido para teste da plataforma. A implementação em software está anexada à este trabalho, no anexo A .

A bancada de ensaios permite ao pesquisador uma ampla gama de estudos voltados a conversores de potência, sendo possível aplicar novas técnicas de controle de malha fechada, em caso da instrumentação com sensores de corrente e tensão ser implementada, já que toda a parte de potência se encontra funcional. Permite também os estudos voltados para a qualidade de energia e investigação dos efeitos da modulação para mitigação de harmônicas no sinal de saída.

Baseado nos testes executados na bancada, assim como os resultados obtidos no capítulo 4, conclui-se então que o objetivo de montagem da plataforma e a realização de testes com uma das técnicas de implementação PWM foi feita com sucesso. Permitindo a trabalhos futuros a troca de elementos da bancada, tal como o microcontrolador, com o propósito de melhorar a técnica implementada ou até mesmo a utilização dos recursos atuais para comparação com técnicas mais avançadas.

Referências

- ABEEÓLICA, A. B. d. E. E. Boletim anual de geração eólica. 2017. Citado na página 14.
- ALLOUHI, A. et al. Energy consumption and efficiency in buildings: current status and future trends. *Journal of Cleaner production*, Elsevier, v. 109, p. 118–130, 2015. Citado na página 13.
- BATISTA, F. A. B. et al. Modulação vetorial aplicada a retificadores trifásicos pwm unidirecionais. Florianópolis, SC, 2006. Citado na página 28.
- BOGLIETTI, A. et al. Different pwm modulation techniques indexes performance evaluation. In: *ISIE '93 - Budapest: IEEE International Symposium on Industrial Electronics Conference Proceedings*. [S.l.: s.n.], 1993. p. 193–199. Citado na página 25.
- BONELLI, A. F. et al. Modelagem e simulação de unidade eólica para estudos de indicadores de qualidade da energia elétrica. Universidade Federal de Uberlândia, 2010. Citado na página 18.
- BRAGA, N. C. *Mechatronics sourcebook*. [S.l.]: Thomson/Delmar Learning, 2003. Citado 3 vezes nas páginas 7, 26 e 27.
- CARVALHO, B. C. et al. Desenvolvimento de modelo computacional de sistemas eólicos utilizando geradores síncronos para estudos de desempenho no contexto da qualidade da energia elétrica. Universidade Federal de Uberlândia, 2006. Citado 3 vezes nas páginas 7, 18 e 19.
- CHAPMAN, S. J. *Fundamentos de máquinas elétricas*. [S.l.]: AMGH Editora, 2013. Citado na página 23.
- EPE, E. D. P. E. Anuário estatístico de energia elétrica 2017 – ano base 2016. *Rio de Janeiro: EPE*, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 13.
- GWEC, G. W. E. C. Global wind statistics 2017. p. 4, 2017. Citado na página 14.
- MARQUES, J. et al. Turbinas eólicas: Modelo, análise, e controle do gerador de indução com dupla alimentação. Universidade Federal de Santa Maria, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 22.
- MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. O aproveitamento da energia eólica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 30, n. 1, p. 1304, 2008. Citado na página 17.
- MENDES, V. F. Avaliação do comportamento de um sistema de conversão de energia eólica utilizando gerador de indução duplamente excitado durante afundamentos de tensão equilibrados e desequilibrados. 2009. Citado na página 32.
- MICROCHIP, A. *Atmel ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V Datasheet*. 2549q. ed. [S.l.], 2014. Citado 3 vezes nas páginas 8, 9 e 40.

- MWINYIWIWA, B.; WOLANSKI, Z.; OOI, B.-T. Microprocessor implemented spwm for multiconverters with phase-shifted triangle carriers. In: IEEE. *Industry Applications Conference, 1997. Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS'97., Conference Record of the 1997 IEEE*. [S.l.], 1997. v. 2, p. 1542–1549. Citado na página 30.
- NAZLEE, A. M. et al. Space vector pwm for pmsm simulation using matlab simulink. In: APCCAS. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1127–1130. Citado 3 vezes nas páginas 9, 29 e 30.
- PEREIRA, R.; FUKUDA, N. Energia eólica já abastece mais de 30% do nordeste. jun 2016. Disponível em: <<https://www.industriahoje.com.br/energia-eolica-ja-abastece-mais-de-30-do-nordeste>>. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 21.
- PINTO, M. de O. *Fundamentos de energia eólica*. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2013. Citado 7 vezes nas páginas 7, 17, 18, 20, 21, 22 e 23.
- REIS, A.; OLIVEIRA, J. C. de. Uma análise dos fatores de influência na geração de distorções harmônicas em unidades eólicas. In: *XI Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica (CBQEE)*. [S.l.: s.n.], 2015. Citado 3 vezes nas páginas 7, 13 e 25.
- ROCHA, C. A. Correlação operativa entre parques eólicos e a regulação de tensão do ponto de acoplamento. Universidade Federal de Uberlândia, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 7, 27 e 28.
- SALIM, N. A.; KAPROWI, M. A.; SAMAT, A. A. A. Generation of space vector pwm by using arduino uno. *Pertanika Journal of Science and Technology*, UNIV PUTRA MALAYSIA PRESS SERDANG, SELANGOR, 00000, MALAYSIA, v. 25, p. 171–179, 2017. Citado na página 27.
- SANTOS, G. V. *Sistemas de Controle Aplicado Aerogeradores Sincronos com Conversor Back-to-Back*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2015. Citado na página 24.
- SIEMINSKI, A. et al. International energy outlook. *Energy information administration*, v. 18, 2014. Citado na página 13.
- SILVEIRA, J. P. C. Avaliação de distorções harmônicas e inter-harmônicas de um sistema de conversão de energia eólica com gerador síncrona. 2017. Citado 7 vezes nas páginas 7, 9, 19, 28, 29, 30 e 50.
- SOARES, L. Modelagem e controle de um conver-sor back-to-back para aplicao em gerao de energia elica. *SBSE 2012*, p. 1–6, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- TEODORESCU, R.; LISERRE, M.; RODRIGUEZ, P. *Grid converters for photovoltaic and wind power systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. v. 29. Citado na página 24.
- ZULKIFLI, S. A.; HUSSIN, M. N.; SAAD, A. S. Matlab-arduino as a low cost microcontroller for 3 phase inverter. In: *2014 IEEE Student Conference on Research and Development*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–5. Citado na página 30.

Anexos

ANEXO A – Código SPWM

```

1  #include <avr/io.h>
2  #include <avr/interrupt.h>
3  #include <math.h>
4
5  #define SinDivisions 500// Amostras da onda senoidal
6
7  static int microMHz = 16; // Frequencia do microcontrolador
8  static int freq = 60;     // Frequencia da senoide
9  static long int period;   // Período do PWM
10 static unsigned int lookUpA[SinDivisions]; // Fase 0
11 static char _TCCR1 = 0b10000010;
12 static char _TCCR3 = 0b10000010;
13 static char _TCCR4 = 0b10000010;
14 static boolean flag_t1;
15 static boolean flag_t3;
16 static boolean flag_t4;
17 static boolean defase_3 = 0;
18 static boolean defase_4 = 0;
19 static int defase_control = 0;
20 static int Ms;
21
22 int main(void){
23
24     double temp;
25
26     period = microMHz*1e6/freq/SinDivisions;// Calculo do
27         Período Discreto
28
29     for(int i = 0; i < SinDivisions/2; i++){ // Gerando duty
30         senoidal
31         temp = sin((i+0.5)*2*M_PI/SinDivisions)*period;
32         lookUpA[i] = (int)(temp+0.5);
33     }
34
35     TCCR1A = TCCR3A = TCCR4A = _TCCR1; // 0b10000010;
36         /*10 zera compA quando atinge 0
37         00 zera compB quando atinge 0
38         00 para compC

```

```

37         10 WGM1 1:2 para FastPWM
38         */
39     TCCR1B = TCCR3B = TCCR4B = 0b00011001;
40         /*000
41         11 WGM1 3:2 para FastPWM
42         001 sem prescaler
43         */
44     TIMSK1 = 0b00000001;
45         /*0000000
46         Habilitando interrupcao
47         */
48     ICR1 = ICR3 = ICR4 = period; // Valor de topo para
        atualizacao do duty-cycle
49
50     sei(); // Habilitando interrupcoes
51
52     DDRB = 0xFF; // Habilitando portas de Saida B
53     DDRE = 0xFF; // Habilitando portas de Saida E
54     DDRH = 0xFF; // Habilitando portas de Saida H
55
56     while(1); //Laco Infinito
57 }
58
59 ISR(TIMER1_OVF_vect){
60     static int num1;
61     static int num3;
62     static int num4;
63
64     if(flag_t1 == 1){
65         _TCCR1 ^= 0b10100000; // Realizando a parte
            negativa do sinal senoidal
66         TCCR1A = _TCCR1;
67         flag_t1 = 0; // Reset flag
68     } else if(num1 >= SinDivisions/2){
69         num1 = 0; // Reset num
70         flag_t1 = 1; // Setando Flag
71     }
72
73
74     if((defase_control == SinDivisions/3) || (defase_3 == 1))
75     {
        defase_3 = 1;
    }

```



```
76         if(flag_t3 == 1){
77             _TCCR3 ^= 0b10100000; // Realizando a
78                 parte negativa do sinal senoidal
79             TCCR3A = _TCCR3;
80             flag_t3 = 0; // Reset flag
81         } else if(num3 >= SinDivisions/2){
82             num3 = 0; // Reset num
83             flag_t3 = 1; // Setando
84                 Flag
85
86     OCR3A = OCR3B = lookUpA[num3]; // Atualizar valor do duty
87         (semi-ciclo positivo)
88     num3++;
89 }
90
91 if((defase_control == 2*SinDivisions/3) || (defase_4 ==
92     1)){
93     defase_4 = 1;
94     if(flag_t4 == 1){
95         _TCCR4 ^= 0b10100000; // Realizando a
96             parte negativa do sinal senoidal
97         TCCR4A = _TCCR4;
98         flag_t4 = 0; // Reset flag
99     } else if(num4 >= SinDivisions/2){
100         num4 = 0; // Reset num
101         flag_t4 = 1; // Setando
102             Flag
103     }
104
105     OCR4A = OCR4B = lookUpA[num4]; // Atualizar valor do duty
106         (semi-ciclo positivo)
107     num4++;
108 }
109
110 OCR1A = OCR1B = lookUpA[num1]; // Atualizar valor do duty
111         (semi-ciclo positivo)
112     num1++;
113     defase_control++;
114 }
```